

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

ЧЕРЕПАНСЬКА Ірина Юріївна

УДК 621.317.08

ПРЕЦИЗІЙНА ПРИЛАДОВА СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ

05.11.01 – прилади та методи вимірювання механічних величин

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматизації та комп'ютерні-інтегрованих технологій ім. професора Б.Б. Самотокіна в Житомирському державному технологічному університеті Міністерства освіти та науки України.

Науковий консультант:

доктор технічних наук, професор

БЕЗВЕСІЛЬНА Олена Миколаївна

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Міністерства освіти та науки України, професор кафедри приладобудування

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор

КВАСНІКОВ Володимир Павлович

Національний авіаційний університет Міністерства освіти та науки України, завідувач кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій Інституту інформаційно-діагностичних систем

доктор технічних наук, професор

КОШОВИЙ Микола Дмитрович

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського “Харківський авіаційний інститут” Міністерства освіти та науки України, завідувач кафедри авіаційних приладів і вимірювань

доктор технічних наук, доцент

ТИХАН Мирослав Олексійович

Національний університет “Львівська політехніка” Міністерства освіти та науки України, доцент кафедри приладів точної механіки

Захист відбудеться „25” жовтня 2019 р. о 14:30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.07 при Національному технічному університеті України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37, корпус № 1, кімната № 317.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий „18” вересня 2019 року.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради



Ю.В. Киричук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Велика кількість важливих сучасних науково-господарських задач передбачає проведення різноманітних вимірювань механічних величин, зокрема величин плоских кутів. Високоточні (прецизійні) кутові вимірювання є необхідними у багатьох галузях науки і техніки, наприклад, таких як:

- *прецизійне приладо- та машинобудування, робототехніка* для контролю геометричних параметрів об'єктів виробництва, їх просторового положення, точного виставлення інструменту, оснащення та робочих органів, вимірювальної апаратури, верстатів, промислових роботів тощо;

- *навігація та орієнтація* для визначення положення об'єктів відносно визначеної системи координат, при проектуванні і створенні апаратури точної навігації та керування рухом, виставлення, а також просторової орієнтації тощо;

- *будівництво* для контролю окремих елементів та споруд у цілому;

- *астрономія, геодезія* для визначення координат небесних та наземних об'єктів, для технологій, пов'язаних з розробкою і створенням систем геодезії, навігації та орієнтації, різних систем навігації та астроорієнтації (наприклад, космічних і морських), при створенні великогабаритних оптичних систем та інтерферометрів;

- *радіо- та лазерна локація, оптичні системи* для визначення траєкторії об'єктів, у системах астроорієнтації і вимірювань кутів для керування антенами, телескопами чи оптичними блоками астронавігації, наприклад, при наведенні на ціль і для визначення координат при спостереженні за ціллю;

- *металургія* для визначення хімічного складу металів при сортуванні металобрухту, продукції на складах, для вхідного контролю металургійної сировини, у ливарних цехах для експрес-аналізу металовмісних матеріалів у режимі реального часу під час плавки металу, для сертифікаційного аналізу продукції тощо.

При цьому галузі використання кутовимірювальних засобів постійно розширюються. У той же час стрімко покращується якість цих засобів, що обумовлюється високими вимогами сучасного виробництва до якості продукції та виконуваних робіт. Це означає, що засоби вимірювання, зокрема кутовимірювальні прилади, системи та комплекси, повинні бути високоякісними.

Необхідно враховувати, що якість відповідно до міжнародних стандартів серії ISO 9000 та Державного стандарту України ДСТУ ISO 9002-95 – це комплексне поняття, під яким розуміється сукупність властивостей продукції, що визначає ступінь її придатності для використання за призначенням. Основними показниками якості відповідно до того ж стандарту є точність та швидкодія.

Вказане спонукає на розробку нових прецизійних приладових систем для підвищення точності та швидкодії вимірювання кутів, а отже і якості виконуваних робіт у цілому.

Роботи у галузі кутових (гоніометричних) вимірювань проводяться в таких наукових центрах України як “КП ім. Ігоря Сікорського”, КП СПС “Арсенал”, ПАТ “НВО “Київський завод автоматики”, так і за кордоном – в США (компанією Brookhaven Instruments Corporation) та Європі, зокрема в Німеччині (компаніями Trioptics, DataPhysics Instruments GmbH, Moeller-Wedel), Великобританії (компанією Renishaw), Франції (компанією GBX), Фінляндії (компаніями Kibron Inc., Kruss GmbH, KSV Instruments Ltd) та ін. наступними науковцями Julia F Glatthorn, Wan Fong Hoang, Shuler M., Gebelin H., Andrews D. F.,

Bickel P. J., Hampel F. R., Huber P. J., Rogers W. H., Tu-Key J., Gauss C. F., Glissman T., Moritz H., Nabauer M., Saastamoinen J., Tengstrom E., Williams D., Simone Stauffacher, Wittke H., Filyaevskih R. I., Gan M. A., Rehan K., Sultana S., Zubair Khan M., Farooq Z., Mateen A., Nicola A Maffiuletti, Hans Gerber, Humayun M., Francesco Capitelli, Provenzano M. R., Francesco Colao, Nicola Senesi, Prasoon Diwakar, Pramod Kulkarni, Eileen Birch M., Achouri M., Baba-Hamed T., Beldjilali S. A., Belasr A., Kazunori Akizuk, Kazuto Yamaguchi, Yoshiyuki Morita, Yukari Ohashi, Silvio Nussbaumer, Michael Leunig та ін.

Вагомі науково-практичні дослідження у цій галузі зроблено такими вченими, як Павлов П.А., Філатов Ю.В., Зайцев І.І., Зозуля Л.Г., Ванюрихін А.І., Кравченко В.І., Левченко Є.Г., Борисюк Л.В., Демчук В.Ю., Балла А.А., Виноградов Е.Ф., Аксененко В.Д., Тучин В.В., Апенко М.І., Афанасьєв В.А., Аникст Д.А., Константинович К.М., Меськин І.В., Мейко Б.С., Домрачев В.Г., Шляндин В.М., Бичков С.І., Лук'янов Д.П., Шестопапов Ю.Н., Мардиа К.С., Бакаляр А.І., Ахметжанов А.А., Батраков, А.С., Бутусов М.М., Бурнашев М.Н., Сапегин А.Г., Богуславський М. Г., Шарова Є. Є., Федотова І. І., Гречко Ф.М., Смирнова І.І., Стракун Г.Н., Кудрявцев М.Д., Грановський В.А., Казаков А.Я., Сірая Т.Н., Мейко Б.С., Щербань В.І. та ін.

В Україні даними питаннями займаються такі науковці, як Лихоліт М.І., Безвесільна О.М., Зайцев І.І., Осадчий Е. П., Чіковані В.В., Орнадський Д.П., Седаліщев В. Н., Патрушев Е. М., Мухин В. М., Застрогин Ю. Ф., Шарапов В. М., Маляров С.П., Петренко О.В., Бартошинський З.В., Щербань В.І., Яценко Ю. О., Коваленко В.А. та ін.

Більшість відомих на даний час гоніометричних систем характеризується недостатніми точністю і швидкістю, а також складністю, низьким рівнем автоматизації та недосконалістю програмного забезпечення. Тому особливо гостро постає питання щодо необхідності розробки нових та вдосконалення існуючих приладових систем вимірювання кутів.

Важлива і складна наукова проблема, що вирішується у дисертації, полягає у підвищенні точності та швидкодії приладових систем вимірювання кутів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано у рамках дослідницької та науково-методичної роботи кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій імені професора Б.Б. Самотокіна Житомирського державного технологічного університету відповідно до Закону України №3715-VI "Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні", статті 4 "Стратегічні пріоритетні напрями інноваційної діяльності на 2011-2021 роки", зокрема за напрямками "Освоєння нових технологій високотехнологічного розвитку транспортної системи, ракетно-космічної галузі, авіа- і суднобудування, озброєння та військової техніки" та "Розвиток сучасних інформаційних, комунікаційних технологій, робототехніки", а також відповідно до держбюджетної тематики Міністерства освіти і науки України в науково-дослідних роботах № 33 "Наукові основи та фундаментальні дослідження приладової системи для вимірювання механічних величин з цифровими відео зображеннями" (0112U001793, 2014 р.), № 48 "Теорія дослідження температурного поля біопалива нового термоанемометричного витратоміра з використанням алгоритмічних методів, апарату штучних нейронних мереж" (номер державної реєстрації 0114U000545, 2017 р.), № 2019 "Система керування навігаційного комплексу стабілізатора озброєння легких броньованих машин" (номер державної реєстрації 0117U000405, 2017 р.).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення точності та швидкодії гоніометричних вимірювань.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні завдання:

1. Провести аналіз існуючих приладових систем вимірювання кутів та систематизувати відомі підходи щодо підвищення точності та швидкодії для використання отриманих результатів при побудові прецизійної приладової системи вимірювання кутів (ППСВК);

2. Запропонувати сукупність принципів для побудови ППСВК з підвищеною точністю та швидкодією;

3. Оновити математичну модель похибки ППСВК, яка системно враховує особливості її складових для подальшого використання при корекції результатів вимірювання;

4. Розробити підхід до визначення необхідної кількості спостережень при багаторазових вимірюваннях, що корелює із заданою точністю та використовується при нормуванні випадкових складових похибок вимірювання кутів;

5. Розробити штучні нейронні мережі (ШНМ) для функціонування ППСВК з огляду необхідності автоматичного аналізу інформації та її обробки для підвищення точності та швидкодії вимірювання кутів;

6. Розвинути метод ковзного середнього щодо фільтрації вихідного сигналу ППСВК для зменшення флуктуацій та підвищення точності вимірювання;

7. Розробити алгоритмічне та програмне забезпечення, що реалізує автоматизоване функціонування ППСВК, та рекомендації щодо його практичного використання;

8. Впровадити результати роботи у виробництво та у навчальний процес Житомирського державного технологічного університету.

Об'єктом дослідження є процес вимірювання величини плоских кутів за допомогою прецизійної приладової системи вимірювання кутів.

Предметом дослідження є прецизійна приладова система вимірювання кутів підвищеної точності та швидкодії.

Методи досліджень базуються на застосуванні фізичних явищ лазерної спектроскопії, фізичних принципів роботи напівпровідникових фоточутливих елементів, нейромережових технологій, теорії ймовірності та математичної статистики, методів системного підходу, теорії множин, дискретної та обчислювальної математики, а також комп'ютерного моделювання.

Достовірність наукових результатів, висновків та рекомендацій підтверджено вибором апробованих методів досліджень, програмних засобів, комп'ютерним моделюванням, співпадінням теоретичних, експериментальних результатів та досліджень на комп'ютері.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1. Вперше з єдиних системних позицій сформульовані загальні принципи побудови ППСВК як багаторівневої сукупності різних за призначенням та функціонуванням технічних засобів з неоднорідними властивостями, що полягають у формуванні функціональних відношень між параметрами її рівнів та всередині них з врахуванням прийнятого системного підходу. Це дало можливість здійснити синергетичну інтеграцію та реалізацію пропонованих методів (обробки вимірювальної інформації) та засобів (ШНМ, КМОП-матриці);

2. Вперше за принципами синергетичної інтеграції та емерджентності, шляхом застосування фоточутливої матриці на компліментарних структурах метал-окисел-напівпровідник (КМОП-матриці) та ШНМ побудовано ППСВК із розширеними функціональними можливостями (безконтактного вимірювання кутів

та експрес-аналізу інтенсивностей спектрального розподілу для визначення хімічного складу металовмісних матеріалів);

3. Вдосконалено математичну модель похибки ППСВК у частині врахування похибки фоточутливої КМОП-матриці шляхом введення флуктуаційних напруг, які виникають на пікселях матриці через дробовий ефект та при тепловому русі зарядів відповідно, що у результаті дає можливість підвищити точність вимірювання ППСВК;

4. Вперше запропоновано новий підхід до автоматичного розпізнавання систематичних та випадкових складових похибок вимірювання кутів, який базується на використанні ШНМ на етапі аналізу та обробки вимірювальної інформації, експрес-аналізу складових похибок вимірювання за принципом декомпозиції, що дозволило підвищити точність та швидкодію обробки вимірюваної інформації у 1,3 рази;

5. Вперше запропоновано використання ШНМ для експрес-аналізу інтенсивностей спектрального розподілу хімічних речовин, що дало принципову можливість проводити автоматичне визначення їх вмісту у складі металовмісних матеріалів у режимі реального часу зі швидкістю 2,5 с;

6. Вперше проведено визначення складових похибок вимірювання кутів на ЕОМ з використанням ШНМ, що дало принципову можливість автоматизувати процес обробки вимірювальної інформації, а також проводити експрес-аналіз складових похибок вимірювання у режимі реального часу зі швидкістю 2 с.

Порівняння результатів моделювання на ЕОМ процесу визначення складових похибок вимірювання кутів для багатограних призм, які використовуються для регулювання і настройки кутомірних приладів і безпосереднього вимірювання кутів промислових виробів з використанням двох підходів – застосування ШНМ та дисперсійного аналізу за критерієм Фішера, вказало на переважність ШНМ щодо швидкості порівняно з традиційно використовуваним критерієм;

7. Вперше запропоновано підхід щодо визначення кількості вимірювань, що дозволяє обґрунтовано визначити необхідну кількість вимірювань кутів ППСВК, яка є достатньою для досягнення заданої точності.

У результаті експериментально доведено, що запропонований метод дозволяє підвищити швидкість (у 1,3 рази або на 25 %) вимірювань кутів порівняно із відомими.

Практичне значення одержаних результатів дисертаційної роботи визначається її спрямованістю на підвищення точності та швидкості вимірювання кутів. Практичними результатами є наступні:

1. Доопрацьована конструкція широкозастосовуваної гоніометричної системи ГС1Л шляхом введення КМОП-матриці та ШНМ, що дозволяє проводити безконтактні вимірювання кутів та здійснювати відповідні інженерні розрахунки при обробці результатів вимірювання з більшою точністю та швидкістю;

2. Розроблено конструкцію ППСВК на основі ШНМ та фоточутливої КМОП-матриці. Це дозволило розширити функціональні можливості ППСВК порівняно із відомими в частині експрес-аналізу хімічних елементів у металовмісних матеріалах за методом емісійного спектрального аналізу залежностей спектральних ліній від вмісту хімічних елементів у матеріалах;

3. Розроблено метод визначення систематичних та випадкових складових похибок вимірювання на основі ШНМ, що дає можливість зосередити зусилля користувачів на виборі вірного методу їх обробки, нормування, та компенсації відповідно до вимог, що регламентуються нормативними документами;

4. Новизну пропонування технічних рішень підтверджено двома патентами

України на корисну модель № 57135 та 127373, використання змісту яких, дозволяє розв'язувати задачі вимірювання кутів з підвищеними точністю та швидкістю.

Впровадження результатів роботи. Теоретичні і практичні здобутки роботи впроваджено на підприємствах ПАТ “НВО “Київський завод автоматики”, у навчальний процес в Житомирському державному технологічному університеті при викладанні дисциплін “Основи метрології”, “Технологічні вимірювання та прилади”, “Технології штучного інтелекту”, “Планування, моделювання та верифікація процесів у ГВС”, що підтверджено відповідними актами та довідками.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення та результати, винесені на захист, отримані автором самостійно. З наукових праць, опублікованих у співавторстві, у дисертації використані ті результати, що є результатом особистої праці здобувача. Достовірність і обґрунтованість результатів дисертаційної роботи підтверджено збіжністю аналітичних розрахунків з експериментальними і комп'ютерним моделюванням.

Особистий внесок здобувача у працях, що опубліковані у співавторстві: [1] – розділ 1 підготовлений здобувачем, а розділи 2, 3, 4 – спільно із співавторами; [2] – розділ 2, 3 підготовлений здобувачем, а розділи 1 та 4 – спільно із співавторами; [3] – розділ 2, 4 підготовлений здобувачем, а розділи 1 та 3 – спільно із співавторами; [3] – розділ 3 підготовлений здобувачем, а розділи 1, 2 та 4 – спільно із співавторами; [5] – здобувачем розроблено структурну схему автоматизованого технологічного комплексу високоточного вимірювання кутів на базі гоніометра, що дозволяє реалізувати автоматизовану обробку вимірювальної інформації в режимі реального часу; [6] – здобувачем проаналізовано а також представлено сукупністю відповідних компонентів систематичну похибку розроблюваної автоматизованої високоточної гоніометричної системи, за результатами попереднього аналізу джерел її виникнення; [7] – здобувачем розроблено нейропроцесор для компенсації динамічних похибок інтелектуального високоточного термоанемометричного витратоміру біопалива; [8] – здобувачем розглянуто особливості процесу оцінки та нормування випадкової складової похибки вимірювання гоніометричної системи з елементами штучного інтелекту; розроблено загальну методику нормування випадкової складової похибки вимірювання, яка дозволить обґрунтовано визначати необхідну та достатню кількість повторів вимірювань для досягнення заданої точності; [9] – здобувачем розроблено штучну нейронну мережу для визначення складових похибок вимірювання кутів автоматизованими гоніометричними системами; [10] – здобувачем розроблено нову прецизійну інтелектуальну гоніометричну систему на базі лазерного гоніометра, КМОП-матриці та штучної нейронної мережі, а також з використанням методу спектроскопії, нейромережевих технологій та фізичних принципів роботи фотоелементів; [11] – здобувачем розроблено штучну нейронну мережу, яка дозволяє розпізнавати складові похибок вимірювання в режимі реального часу при гоніометричних вимірюваннях величин плоского кута багатограних призм та є альтернативою традиційному методу дисперсійного аналізу за критерієм Фішера множини вимірювальних даних, а також дозволяє автоматизувати аналіз вимірювальної інформації при нормуванні похибок вимірювання; [12] – здобувачем розроблено інтелектуальну гоніометричну систему та штучну нейронну мережу; [13] – здобувачем розроблено методику автоматизованого вибору пристроїв орієнтування, як основу системи підтримки прийняття рішень для автоматизації процесу керування вибором пристроїв орієнтування; [14] – здобувачем розроблено систему підтримки прийняття рішень, що орієнтована на аналіз значних об'ємів різномірної інформації при автоматизації процесу вибору пристроїв орієнтування для гнучких інтегрованих систем; [15] –

здобувачем запропоновано підхід до створення автоматизованої класифікації пристроїв орієнтування з використанням штучних нейронних мереж; [16] – здобувачем розроблено програмне забезпечення для автоматизації процесу вибору пристроїв орієнтування гнучких інтегрованих систем; [17] – здобувачем проведено експериментальне дослідження роботи розроблених штучних нейронних мереж для задач класифікації пристроїв орієнтування; [18] – здобувачем визначено напрямки подолання негативного впливу явища “конфлікт сили” на складові технологічної роботизованої системи при підвищенні точності промислових роботів за умов механообробних ГВК; [19] – здобувачем досліджено залежність вартості промислових роботів від величини похибки позиціонування; [20] – здобувачем підготовлено теоретичне обґрунтування необхідності застосування нового математичного апарату кватерніонів для підвищення точності маніпуляційних систем; [21] – здобувачем розроблено штучні нейронні мережі для задач класифікації об’єктів виробництва ГВС та експериментально досліджено їх роботу; [22] – здобувачем розроблено систему інтелектуального керування подачею палива у інжекторний двигун внутрішнього згорання на основі нечіткої логіки; [23] – здобувачу належить основна ідея винаходу; [24] – здобувачу належить основна ідея винаходу; [25] – здобувачем визначено вхідні та вихідні вектори і структура штучної нейронної мережі; [26] – здобувачем надано інформацію щодо змісту інтегрованого показника якості; [27] – здобувачем розглянуто фактори, що впливають на точність промислових роботів; [28] – здобувачем викладено відомості щодо точності промислових роботів; [29] – здобувачу належить ідея застосування штучних нейронних мереж для автоматизації керування нормуванням часу; [30] – здобувачем розроблено структурну схему системи підтримки прийняття рішень для автоматизації керування якістю на механообробних підприємствах; [31] – здобувачем сформульовані принципи автоматизації вимірювання кутів; [32] – здобувачем проведено аналітичний огляд систем вимірювання геометричних параметрів об’єктів виробництва у машинобудуванні; [33] – здобувачем проведено дослідження точності високоточного термоанемометричного витратоміру біопалива; [34] – здобувачем розроблено структурну схему штучної нейронної мережі; [35] – здобувачем проведено аналітичний огляд апаратної та часової складності логічних елементів; [36] – здобувачем сформульовані принципи побудови прецизійної приладової системи вимірювання кутів; [37] – здобувачем розроблено штучну нейронну мережу та досліджено її роботу.

Апробація результатів дисертації. Викладені у дисертаційній роботі результати досліджень доповідалися, обговорювалися та одержали схвалення на 13 наукових конференціях і семінарах: міжвузівська науково-практична конференція, присвячена Дню науки (Житомир, 17-18 травня 2012 р.); четверта Міжнародна науково-практична конференція “Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2012)” (м. Херсон, 2012 р.); Всеукраїнська науково-практична конференція “Сучасні технології промислового комплексу” (м. Херсон, 2015 р.); Всеукраїнська науково-технічна конференція “Комп’ютерні технології: інновації, проблеми, рішення” (м. Житомир, 2015 р.); XIII Міжнародна заочна науково-практична конференція “Развитие науки в XXI веке” (м. Харьков, 2016 р.); II Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю “Комп’ютерне моделювання та оптимізація складних систем” (м. Дніпро, 2016 р.); VI Міжнародна науково-практична конференція “Метрологія, технічне регулювання, якість: досягнення та перспективи” (м. Одеса, 2016 р.); System, Control and Information Technology (Warsaw, 2016); Всеукраїнська науково-практична конференція “Автоматизоване управління багатовимірними об’єктами

на засадах обчислювального інтелекту” (м. Івано-Франківськ, 2018 р.); XI Міжнародна науково-практична конференція “Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси” (м. Київ, 2018); Міжнародна науково-практична конференція “Aktuelle themen im kontext der entwicklung der modernen wissenschaften” (Dresden, 2019); Міжнародна науково-практична конференція “La science et la technologie à l'ère de la société de l'information” (Bordeaux, France, 2019).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 37 наукових праць, у тому числі 4 монографії, 18 статей у наукових фахових виданнях (з них 8 у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 2 патенти на корисну модель, 13 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура та загальний обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, 6 розділів, загальних висновків та 5 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 432 сторінки. Основний зміст викладено на 370 сторінках, який містить 113 рисунків, 41 таблицю. Список використаних інформаційних джерел по розділах становить: розділ 1 – 166 джерел, розділ 2 – 91 джерело, розділ 3 – 29 джерел, розділ 4 – 48 джерел, розділ 5 – 17 джерел, розділ 6 – 30 джерел.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та основні завдання досліджень, показано зв'язок обраного напрямку з науковими програмами, планами, темами, сформульовано наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено дані про особистий внесок здобувача, публікації, апробацію та впровадження результатів досліджень.

Показано, що наукова проблема, яка розв'язується в роботі, є актуальною для різних галузей промисловості та господарства України, де на практиці використовуються засоби для вимірювань величин кутів.

У **першому розділі** розглянуто сутність та зміст задач вимірювання величин плоских кутів. Показано, що розв'язана у дисертації наукова проблема підвищення точності та швидкодії вимірювання кутів є актуальною для різних галузей промисловості та господарства України, зокрема для таких провідних галузей як приладо- та машинобудування, військова справа, металургія, геодезія, медицина та ін., в яких на практиці використовуються кутовимірювальні засоби. Це обумовлюється тим, що сучасний світовий промисловий ринок та міжнародні стандарти висувають високі вимоги до якості продукції, що виготовляється, яка забезпечується різними технічними засобами і в тому числі приладовими системами вимірювання кутів.

Проведена систематизація відомих підходів щодо вирішення проблеми підвищення точності та швидкодії вимірювання кутів. В результаті теоретичного узагальнення встановлено, що підвищення точності та швидкодії досягається за рахунок розробки нових та вдосконалення існуючих гоніометричних систем.

Проведено аналіз сучасного стану світового ринку приладових систем вимірювання кутів з розробкою відповідних класифікацій, систематизовано їх основні технічні характеристики. Проведений аналіз показав, що сучасні гоніометричні системи найкращих світових зразків (наприклад, виробництва Brookhaven Instruments Corporation США, Trioptics Німеччина та ін.) володіють такими основними перевагами як висока точність, автоматизована обробка інформації, швидкодія і розширені функціональні можливості, але висока вартість робить їх недоступними до використання в межах України. В Україні та інших країнах, зокрема Чехії, Словаччині, Білорусі тривалий час в якості еталонного

засобу вимірювання кутів використовувалась кутовимірювальна система ГС1Л, що є розробкою КП СПС “Арсенал” за активною участю кафедри приладобудування НТУУ “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”. Проте похибки сучасних гоніометричних систем найкращих світових зразків є меншими за похибку ГС1Л, яка становить 0,5”, та не перевищують 0,1”. Проведено аналіз факторів, що впливають на появу похибок вимірювання кутів. Як результат теоретично узагальнених підходів щодо підвищення точності та швидкодії вимірювання кутів запропоновано на базі відомої ГС1Л побудувати ППСВК підвищеної точності та швидкодії.

У **другому розділі** обґрунтовано сукупність принципів для побудови пропонованої ППСВК з підвищеною точністю та швидкодією. Комплексне дотримання запропонованих принципів дозволило отримати якісно нову вимірювальну систему з підвищеною точністю та швидкодією порівняно із відомими.

Виокремлено нові методи та засоби, що ґрунтуються на системному підході, фізичних явищах лазерної спектроскопії, принципах роботи напівпровідникових фоточутливих елементів, нейромережових технологіях синергетична інтеграція яких у побудованій системній моделі пропонованої ППСВК дозволила підвищити точність (на 20 % порівняно із відомими) та швидкість (до масштабів реального часу) вимірювання кутів, а також розширити її функціональні можливості, зокрема можливості використання пропонованої ППСВК в якості спектрометра.

Розроблено структурну схему пропонованої ППСВК, яка організована як функціональна сукупність різних технічних засобів з неоднорідними властивостями. Побудовано інформаційну модель функціонування пропонованої ППСВК.

Загальним підходом до побудови ППСВК є системний підхід, при якому ППСВК розглядається як ціле, що складається із частин і елементів, які володіють цілісним характером виконуваних функцій. Аналіз інформаційних джерел, в яких описуються приладові системи вимірювання та їх проектування / побудова / синтез, дозволив сформувати принципи побудови ППСВК виходячи перш за все із позицій системності.

Підґрунтям щодо формування множини принципів побудови ППСВК виступає цільова функція $F(x)$, що прямує до \max та на певному рівні абстрагування корелює із точністю та швидкодією вимірювання, а також множиною функціональних можливостей ППСВК:

$$F(x) = f(\Phi(\Delta); \Phi(\tau); \Phi(\xi)) \rightarrow \max, \quad (1)$$

де $\Phi(\Delta)$ – функціонал, що корелює із точністю ε , що пов’язана з величиною похибки Δ : $\Phi(\Delta) = (\Delta \leq 0,12'')$, де $0,12''$ – похибки сучасних гоніометричних систем найкращих світових зразків; $\Phi(\tau)$ – функціонал, що корелює із часом вимірювання τ , який включає в тому числі час обробки вимірювальної інформації: $\Phi(\tau) = (\tau \leq \tau_n)$, де τ_n – режим реального часу при якому обробка інформації здійснюється зі швидкістю розвитку подій; $\Phi(\xi)$ – функціонал, що корелює із множиною n_i , $i = \overline{1, I}$ функціональних можливостей ξ : $\Phi(\xi) = (\xi \geq n_i, i = \overline{1, I})$, де i – найменування функціональних можливостей, наприклад, “вимірювання плоских кутів”, “вимірювання спектральної випромінюваної здатності” та ін.

Запропоновано наступні принципи побудови ППСВК: модульності, інваріантності (гнучкості), автоматизованості, ієрархічності, агрегування

(комплексування), структурованості, системності, емерджентності, самостійності (автономності, незалежності), декомпозиції та композиції, результативності (завершеності), синергетизму. Вказана множина принципів представлена на рис. 1, де затушовані вершини з найменуванням принципів є веденими автором. Комплексне дотримання вказаних принципів дозволило покращити характеристики ППСВК, зокрема підвищити точність та швидкодію вимірювання, а також розширити функціональні можливості, в частині аналізу інтенсивностей спектрального розподілу для визначення хімічного складу металомісних матеріалів.



Рис. 1. Принципи побудови ППСВК та очікувані результати

З використанням наведених принципів розроблено структурну схему пропонуваної ППСВК (рис. 2) та побудовано інформаційну модель її функціонування (рис. 4). Пропонувана ППСВК організована як функціональна сукупність різних технічних засобів з неоднорідними властивостями. Основними новими елементами, що виокремлено та додатково введено в систему є фоточутлива матриця та ШНМ, а також підсистема фільтрації на основі фільтра Калмана. Функціонування окремих елементів, зокрема КМОП-матриці та ШНМ ґрунтується на фізичних явищах лазерної спектроскопії, принципах роботи напівпровідникових фоточутливих елементів, нейромережових технологіях. Фільтр Калмана реалізований його окремим випадком за методом ковзного середнього. Синергетична інтеграція нових елементів в складі ППСВК дозволила застосувати нові методи обробки вимірювальної інформації та підвищити точність і швидкодію вимірювання кутів у відповідності до виразу (1).

Нижній рівень ППСВК (0-level) являє собою рівень формування вхідного вимірювального сигналу α_{in}^A . Даний рівень організований у вигляді підсистеми прецизійного вимірювання кута (ПВК) / subsystem of the angle high-precision measuring (SAM), базовим елементом якої є високоточний лазерний гоніометр (рис. 3), що містить привод 1 обертання, предметний стіл 2, обертовий пристрій 3,

кільцевий лазер 4, автоколіматор 5 з лазерним випромінювачем 6, фоточутливу на компліментарних структурах метал-окисел-напівпровідник (КМОП) / (CMOS – Complementary MetalOxide Semiconductor, APS – Active Pixel Sensor) матрицю 7, блок 8 живлення.

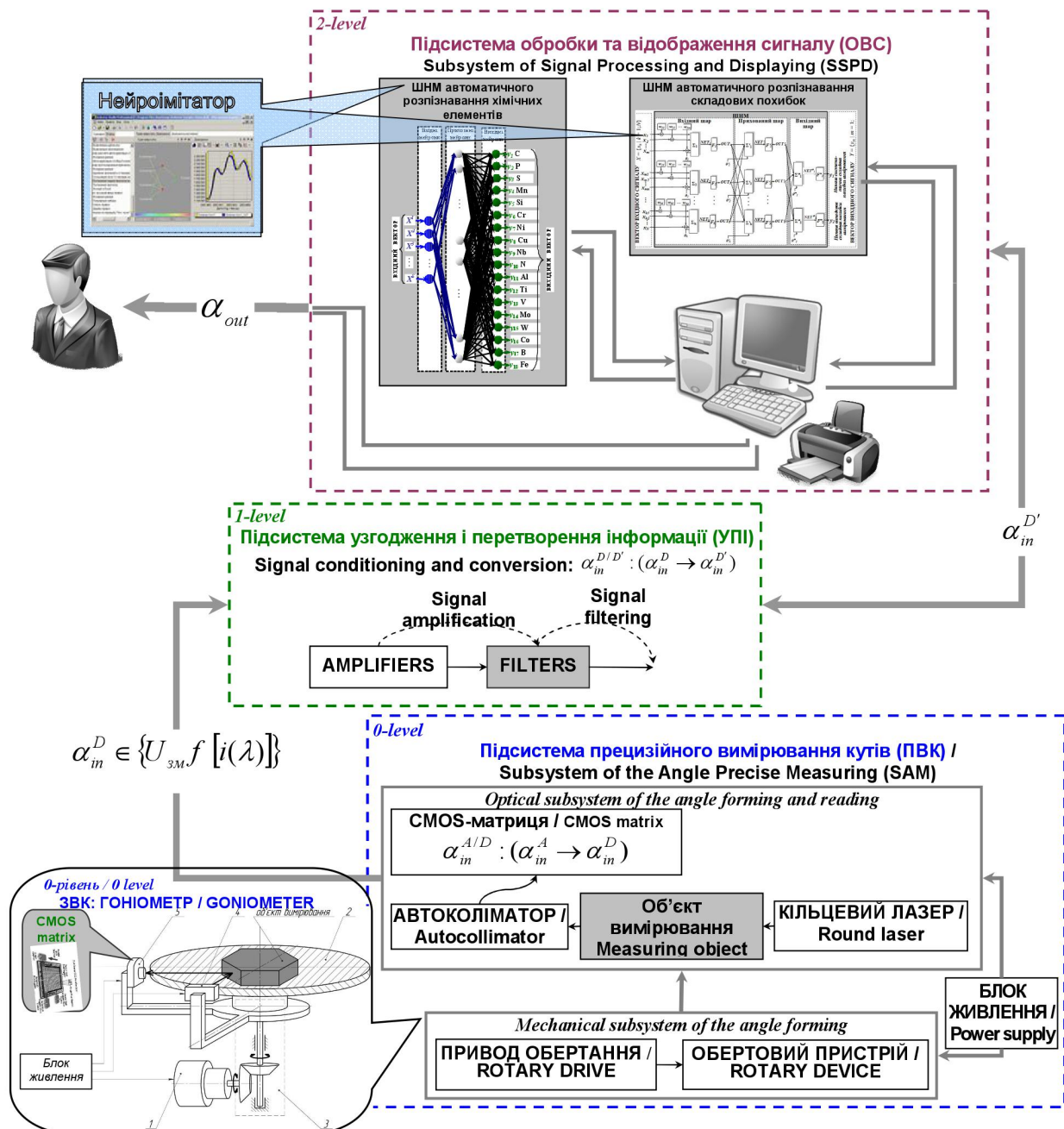


Рис. 2. Структурна схема пропонованої ППСВК

Привод 1 обертання, механічно з'єднаний з предметним столом 2, що встановлений на обертовому пристрої 3. На ньому жорстко закріплені кільцевий лазер 4 і автоколіматор 5 з лазерним випромінювачем 6, КМОП-матрицею 7 для реєстрації випромінювання в інфрачервоному та ультрафіолетовому діапазоні, які підключені до блоку 8 живлення. При вимірюванні кутів на виході автоколіматора 5 отримують потік фотонів, які сприймає КМОП-матриця 7 і перетворює їх на множину цифрових сигналів. Таким чином на виході ПВК формується цифровий сигнал $\alpha_{in}^D \in \{U_{3M} f[i(\lambda)]\}$, де U_{3M} – напруга на виході КМОП матриці, отримана з

фоточутливих елементів (пікселів); $i(\lambda)$ – струм насичення фоточутливих елементів КМОП матриці.

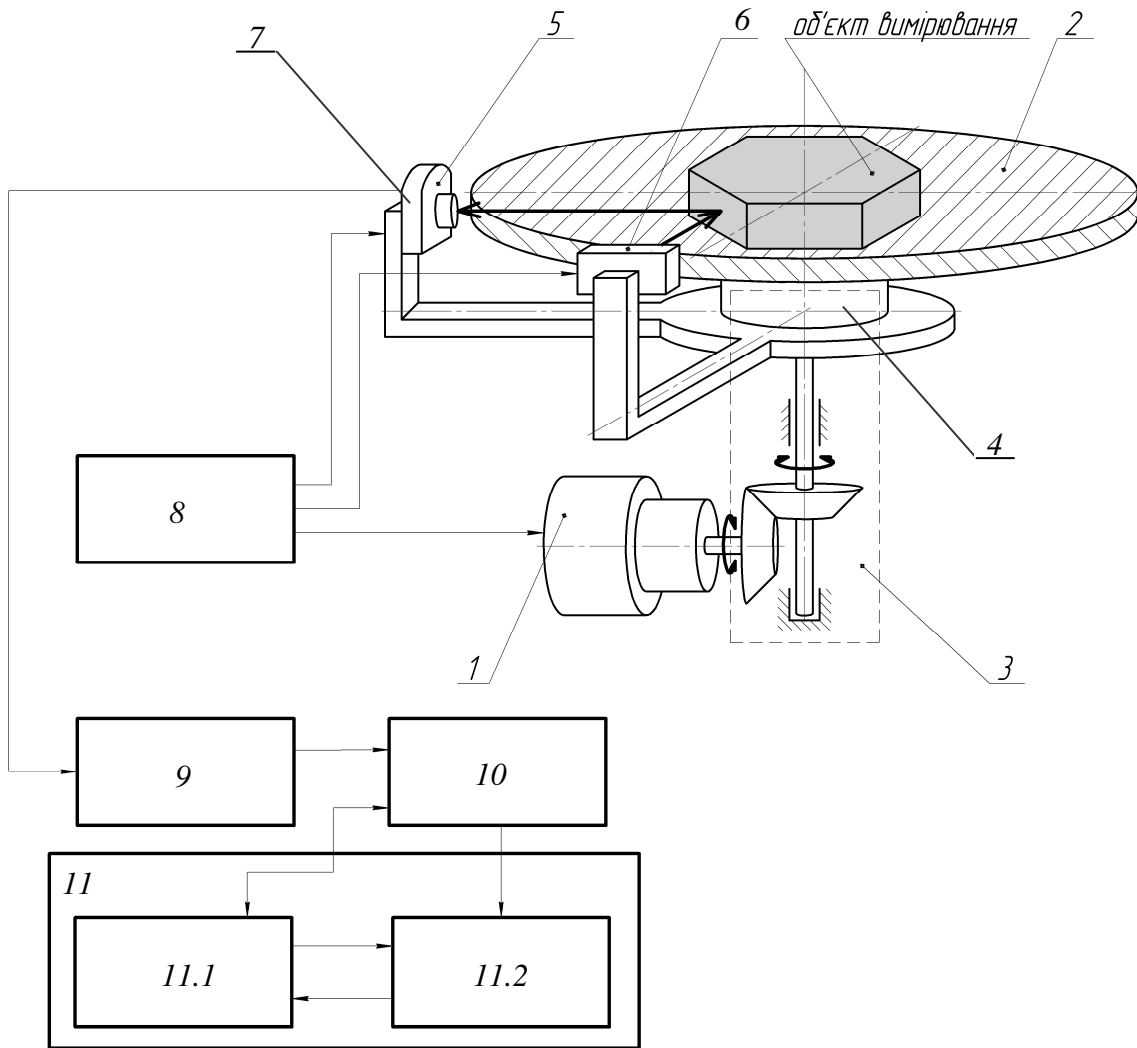


Рис. 3. Блок-схема пропонованої ППСВК

Наступний рівень структури пропонованої ППСВК (див. рис. 2) *1-рівень / 1-level узгодження і перетворення сигналу*. Даний рівень представлений підсистемою *узгодження і перетворення інформації (VIII) / Signal conditioning and conversion (SCC)*. На даному рівні здійснюється попередня обробка цифрових сигналів α_{in}^D від ПВК, тобто підсилення та фільтрація сигналів для їх коректної обробки ШНМ. Базовим елементом *1-level* ППСВК є блок 8 узгодження і перетворення інформації (*information matching and transformation unit*) (рис. 2, рис. 3), який реалізує функцію $\alpha_{in}^{D/D'} : (\alpha_{in}^D \rightarrow \alpha_{in}^{D'})$, де α_{in}^D – цифровий сигнал на виході ПВК, $\alpha_{in}^{D'}$ – відфільтрований сигнал.

З *1-рівня / 1-level* множина вимірювальних даних у цифровій формі $\alpha_{in}^{D'}$ передається на *2-рівень / 2-level – обробки та відображення сигналу / signal processing and display* (див. рис. 2). Даний рівень представлений підсистемою *обробки та відображення сигналу (OBC) / subsystem of signal processing and displaying (SSPD)*. Базовими елементами *2-level* пропонованої ППСВК є ШНМ автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання та ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів (блок 10 на рис. 3), що можуть

бути реалізовані нейропроцесором та спряжені з комп'ютером, або нейроімітатором та інтегровані в операційну систему комп'ютера, як спеціалізований програмний додаток. ШНМ автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання здійснює експрес-аналіз складових похибок вимірювання за принципом декомпозиції в автоматичному режимі та використовується на етапі аналізу та обробки вимірювальної інформації. ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів здійснює експрес-аналіз інтенсивностей спектрального розподілу хімічних речовин для визначення хімічного складу металовмісних матеріалів. Електричний сигнал від КМОП-матриці 7 через блок 8 керування передається до ШНМ, яка визначає хімічний склад досліджуваного об'єкта вимірювання (ОВ) (див. рис. 3). Крім того, підсистема ПВС містить комп'ютер 11, в якому в режимі реального часу у відповідному програмному модулі (блок 11.1 на рис. 3) здійснюється аналіз і обробка результатів від ШНМ та прийняття рішень, а також автоматизована обробка вимірювальної інформації, зокрема, нормування складових похибок вимірювання за відомими методами з представленням результатів у зручній для користувача формі (табличній та / або графічній) через інтерфейс 11.2 користувача.

Пропонована ППСВК дозволяє в автоматизованому режимі проводити безконтактні високоточні вимірювання для попередньої виставки навігаційних чутливих елементів (НЧЕ), плоских кутів та пірамідальності призм, а також інших об'єктів виробництва, показника заломлення оптичного скла з обробкою вимірювальної інформації в режимі реального часу. Крім того пропонована ППСВК дозволяє проводити аналіз інтенсивностей спектрального розподілу для визначення хімічного складу металовмісних матеріалів.

При застосуванні пропонованої ППСВК для проведення аналізу інтенсивностей спектрального розподілу для визначення хімічного складу металовмісних матеріалів лазерний випромінювач 6 використовується в якості джерела потужного енергетичного імпульсу, що короткочасно опромінює ОВ – металевий зразок. ОВ в залежності від хімічного складу формує відповідний спектр випромінювання різної інтенсивності. Відомо, що у інфрачервоному оптичному діапазоні та області видимого спектру метали сильно відбивають випромінювання, що пояснюється переважним розсіюванням світла при його взаємодії з вільними електронами, концентрація яких у металах становить $10^{22} - 10^{23} \text{ м}^{-3}$.

Електрони випромінюють в процесі розсіювання так звані вторинні хвилі. Поглинання квантів світла безпосередньо електронами можливе тільки при їх одночасних зіткненнях з фотонами, домішками хімічних елементів, один з одним тощо. Варто відмітити, що відбиті та поглинені хвилі лазерного випромінювання формуються не на поверхні металевого ОВ, а в речовині, у так званому приповерхневому шарі, в якому затухає випромінювання, що проникає в метал. Сформований світловий потік проектується від оптичної системи 5 на блок 6 матриць, що перетворює його на відповідний електричний сигнал. Різні хімічні елементи, що можуть міститися в ОВ, поглинають енергетичний імпульс від лазера 4 з різною інтенсивністю, та формують різні світлові потоки, що відбиваються під різними кутами та відповідно проектується на різні позиції КМОП-матриці 7. Поглинаюча здатність металів практично не залежить від частоти падаючого лазерного випромінювання і визначається тільки електричними властивостями матеріалів, що залежать в свою чергу від хімічного складу.

Розроблена *інформаційна модель* функціонування пропонованої ППСВК описує зміст та структуру інформаційних потоків та зв'язків між її компонентами та представлена на рис. 4 як орієнтований орг-граф, вершинами якого є функціональні

складові пропонованої ППСВК, а ребрами – інформаційні та енергетичні потоки, які відбуваються при функціонуванні ППСВК і відображають принципи її роботи.

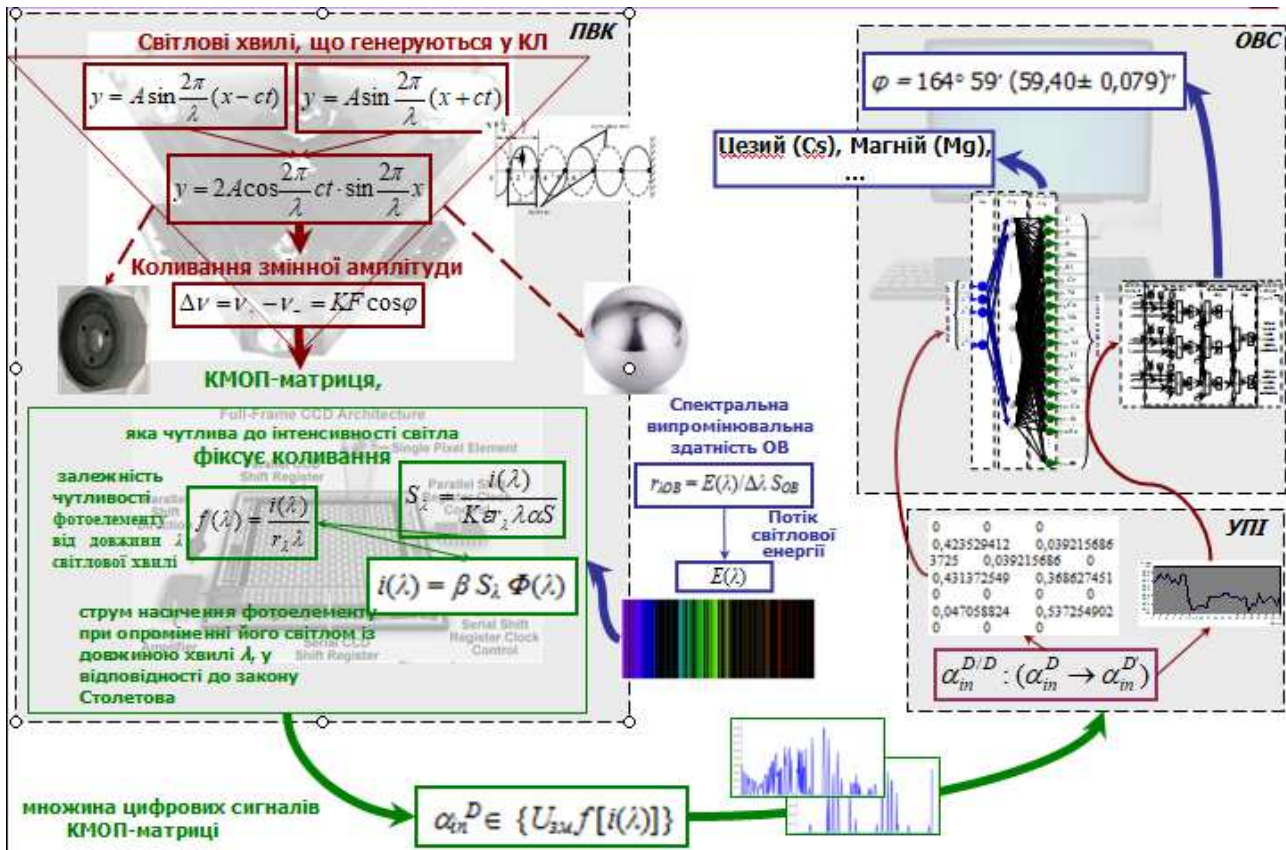


Рис. 4. Схема інформаційної моделі функціонування пропонованої ППСВК

При функціонуванні пропонованої ППСВК, зокрема при обертанні обертового пристрою з ОБ на виході автоколіматора, отримується потік фотонів, що потрапляє на світлочутливі елементи КМОП-матриці, яка формує відповідну множину цифрових сигналів $\alpha_m^D \in \{U_{zm} f[i(\lambda)]\}$.

У залежності від величини вимірюваного плоского кута φ та оптичних показників матеріалу ОБ світловий промінь лазера через оптичну систему автоколіматора 5 проектується з різною інтенсивністю на відповідні позиції (фотоелементи) КМОП-матриці 6, яка перетворює його на відповідний електричний сигнал.

Електричний сигнал від КМОП-матриці 7 через блок 9 узгодження передається на ШНМ 10 а з неї на комп'ютер 11, в якому здійснюється автоматизована обробка вимірювальної інформації. При опроміненні світлом фотоелектронних напівпровідникових елементів КМОП-матриці в них відбувається зміна внутрішнього стану. Зокрема спостерігається збільшення електропровідності пропорційно інтенсивності світлового потоку. Чутливість S_{λ} фотоелементів КМОП-матриці 6 залежить від довжини світлової хвилі λ та визначається за відомою формулою:

$$S_{\lambda} = \frac{i(\lambda)}{K \epsilon_{\lambda} \lambda \alpha S}, \quad (2)$$

де S_{λ} – чутливість фотоелектронного напівпровідникового елементу; $i(\lambda)$ – струм

насичення фотоелементу; K , ε – коефіцієнти пропорційності; r_λ – спектральна випромінювальна здатність фотоелементу; λ – довжина світлової хвилі; α – спектральна поглинаюча здатність матеріалу.

Функція $f(\lambda)$ залежності чутливості S_λ фотоелементу від довжини λ світлової хвилі представляється виразом:

$$f(\lambda) = \frac{i(\lambda)}{r_\lambda \lambda}, \quad (3)$$

де $i(\lambda)$ – струм насичення фотоелементу при опроміненні його світлом із довжиною хвилі λ , у відповідності до закону Столетова описується виразом (4):

$$i(\lambda) = \beta S_\lambda \Phi(\lambda), \quad (4)$$

де S_λ – чутливість фотоелементу на довжині хвилі λ ; $\Phi(\lambda)$ – світловий потік, що попадає на фотоелемент; β – коефіцієнт пропорційності.

З врахуванням того, що світловий потік $\Phi(\lambda)$ являє собою частину потоку світлової енергії $E(\lambda)$, яку відбиває ОВ опромінений світловим імпульсом від лазера 4 на довжині хвилі λ в інтервалі хвиль $\Delta\lambda$, можна вважати, що:

$$\Phi(\lambda) = K E(\lambda), \quad (5)$$

де K – коефіцієнт пропорційності; $E(\lambda)$ – потік світлової енергії випромінюваний ОВ, що визначається за виразом (6):

$$E(\lambda) = r_{\lambda OB} \Delta\lambda S_{OB}, \quad (6)$$

де $r_{\lambda OB}$ – спектральна випромінювальна здатність ОВ опроміненого світловим імпульсом лазера на довжині хвилі λ в інтервалі $\Delta\lambda$ довжин хвиль, що визначається смугою пропускання світлофільтрів оптичної системи автоколیمатора 5 та КМОП матриці 7 ППСВК; S_{OB} – площа поверхні ОВ, що опромінюється; $\Delta\lambda$ – інтервал довжин хвиль, що визначається смугою пропускання світлофільтрів оптичної системи автоколیمатора 5 та КМОП матриці 7 запропонованої ППСВК (див. рис. 3): $\Delta\lambda = \varepsilon \lambda$, де ε – коефіцієнт пропорційності.

Спектральна випромінювальна здатність ОВ $r_{\lambda OB}$ підпорядковується закону Планка, що описує спектральну густину потужності випромінювання абсолютно чорного тіла наступним чином:

$$U(\omega, T) = \frac{\omega^2}{\pi^2 C^3} \cdot \frac{h\omega}{e^{\frac{h\omega}{kT}} - 1}, \quad (7)$$

де h – постійна Планка, $h=1,054 \cdot 10^{-27}$ ерг·с; k – постійна Больцмана, $k = 1,380\,648\,52(79) \cdot 10^{-16}$ ерг·К⁻¹.

Спектральна випромінювальна здатність ОВ $r_{\lambda OB}$ буде залежати від випромінювальних здатностей $r'_{\lambda OB}$ хімічних елементів, що містяться в ньому $r_{\lambda OB} = f(r'_{\lambda OB})$. Величина випромінювальної здатності $r'_{\lambda OB}$ i -го хімічного елементу відповідно до спектральної випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла за

законом Планка та формулою (8) може бути знайдена із наступного виразу:

$$r'_{\lambda OB} = r_{\lambda} \alpha_i, \quad (8)$$

де α_i – спектральна поглинаюча здатність i -го хімічного елементу, що міститься в ОВ. Спектральне випромінювання абсолютно чорного тіла за формулою Планка:

$$r_{\lambda} = 2\pi h c^2 \frac{\lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1}, \quad (9)$$

де h – постійна Планка; c – швидкість світла в вакуумі, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с; k – постійна Больцмана; T – температура за абсолютною шкалою.

Таким чином, КМОП-матриця 7 формує електричні сигнали відповідно до спектрального складу випромінювання ОВ, що залежить від вимірюваного кута та обумовлюється оптичними показниками матеріалу ОВ, які визначаються наявністю відповідних хімічних елементів у матеріалі ОВ.

КМОП-матриця 7 (див. рис. 3) побудована так, що струм $i(\lambda)$ насичення фотоеlementів перетворюється у напругу $U_{зм}$ безпосередньо на пікселі матриці, тобто відбувається реалізація функції $\alpha_{in}^{A/D} : (\alpha_{in}^A \rightarrow \alpha_{in}^D)$ перетворення аналогових сигналів $\alpha_{in}^A \in \{i(\lambda)\}$ в цифровий код $\alpha_{in}^D \in \{U_{зм} f[i(\lambda)]\}$. Вихідний вимірювальний сигнал $\alpha_{in}^D \in \{U_{зм} f[i(\lambda)]\}$, що являє собою цифровий код, визначається множиною електричних імпульсів – напруг $U_{зм}$ змінного значення в залежності від величини струму $i(\lambda)$ насичення фотоеlementів, які подаються до блоку 9 узгодження і перетворення інформації. У блоці 9 сигнали фільтруються $\alpha_{in}^{D/D'} : (\alpha_{in}^D \rightarrow \alpha_{in}^{D'})$ і передаються у підсистему ОВС, зокрема на комп'ютер та ШНМ у вигляді множини чисел $\alpha_{in}^{D'} \subset \{N_i \mid i = \overline{1, n}\}$, яка отримується за один повний оберт обертового пристрою 3 (див. рис. 3):

$$N = \{N_i \mid i = \overline{1, n}\};$$

$$N_i = N_{i-2} + \int_{t_i}^{t_{i+1}} f_{Gout}(t) dt, \quad (10)$$

де i – порядковий номер числа, що відповідає порядковому номеру грані призми; n – кількість граней призми; t_i – час надходження імпульсів до автоколіматора від i -ої грані призми, $t_1, t_2, t_3, \dots, t_{n+1}$ – час надходження імпульсів до автоколіматора від 1, 2, $(n+1)$ -ої грані призми відповідно; f_{Gout} – частота сигналів α_{in}^D від гоніометра.

Таким чином, цифровий сигнал $\alpha_{in}^{D'}$, що передається на комп'ютер та ШНМ, являє собою множину:

$$\alpha_{in}^D \subset \{ N_1 = \int_{t_1}^{t_2} f_{Gout}(t) dt, N_2 = \int_{t_2}^{t_3} f_{Gout}(t) dt, N_3 = N_1 + \int_{t_3}^{t_4} f_{Gout}(t) dt, \\ N_4 = N_2 + \int_{t_4}^{t_5} f_{Gout}(t) dt, N_{n-1} = N_{n-3} + \int_{t_{n-1}}^{t_n} f_{Gout}(t) dt, \\ N_n = N_{n-2} + \int_{t_n}^{t_{n+1}} f_{Gout}(t) dt \}.$$

$$(11)$$

Величина вимірюваного i -го кута φ_i автоматично обчислюється в комп'ютері за виразом:

$$\varphi_i = 2\pi \frac{N_{i-1} + N_i}{N_{n-1} + N_n} = 2\pi \frac{N_\varphi}{N_{2\pi}}; \quad (12)$$

$$N_{i-1} = 0 \text{ при } i=1,$$

де φ_i – виміряне значення кута; i – порядковий номер вимірюваного кута; N_i – множина чисел, що отримується від гоніометра за один повний оберт обертового пристрою 3 (див. рис. 3).

Істинне значення φ_0 вимірюваного кута в ЕОМ розраховується за теоремою про суму кутів правильного багатокутника:

$$\varphi_0 = \frac{180(n-2)}{n}, \quad (13)$$

де n – кількість кутів об'єкту вимірювання.

Також в комп'ютері здійснюється автоматичне обчислення похибки за відповідними методиками. Для цього в ШНМ здійснюється попередня обробка вимірювальної інформації з метою визначення випадкової та систематичної складових похибок вимірювання. Так в ШНМ здійснюється перетворення вхідної інформації, представлені у вигляді так званих вхідних векторів $X = \{x_1, \dots, x_k\}$ у вихідний сигнал OUT , що представляється так званим вихідним вектором $Y = \{y_1, \dots, y_m\}$. Вхідний вектор X автоматично формується із множини цифрових сигналів $\alpha_{in}^{D'}$:

$$X = \{x_1, \dots, x_k\} \Leftrightarrow \alpha_{in}^{D'} \subset \{N_i | i=\overline{1; n}\},$$

де \Leftrightarrow – символ рівнозначності лівої та правої частини вище наведеного виразу.

Конкретний вид перетворення даних, що виконується ШНМ визначається характеристиками штучних нейронів та особливостями архітектури, тобто визначеними підмножинами вхідних, вихідних та прихованих нейронів, кількість яких залежить від структури векторів вхідного $X = \{x_1, \dots, x_k\}$ та вихідного $Y = \{y_1, \dots, y_m\}$ сигналів. Тому при проведенні кутових вимірювань інформація повинна подаватися на вхід ШНМ тільки у цифровій формі. Причому, розмірність вхідного вектора ШНМ $X = \{x_1, \dots, x_k\}$ обумовлюється необхідною кількістю вимірювань.

У **третьому розділі** розроблено математичну модель похибки пропонованої ППСВК (14) за рахунок вдосконалення відомої базової математичної моделі похибки шляхом врахування нестабільності швидкості обертання Землі навколо своєї осі, а також флуктуаційних напруг які виникають при функціонуванні фоточутливої КМОП-матриці і обумовлюються наявністю теплового та дробового ефектів, що виникають в структурних елементах матриці.

Пропонована математична модель похибки ППСВК системно враховує особливості її складових для подальшого використання при корекції результатів вимірювання:

$$\Delta\varphi = f(\Delta\varphi_I; \Delta\varphi_M; \Delta\varphi_S) =$$

$$= \left(2\pi \frac{\int_{t_1}^{t_\varphi} \left[K(t)\omega_\Sigma(t)\cos\alpha(t) + \frac{K_{-1}(t)}{\omega_\Sigma(t)\cos\alpha(t)} + \omega_0(t) \right] dt + N_{q1}}{\int_{t_1}^{t_{2\pi}} \left[K(t)\omega_\Sigma(t)\cos\alpha(t) + \frac{K_{-1}(t)}{\omega_\Sigma(t)\cos\alpha(t)} + \omega_0(t) \right] dt + N_{q2}} + \Delta\varphi_{cal} + \Delta\varphi_{cmos} \right) - \varphi, \quad (14)$$

$$\delta_{cmos} = \delta_{cmos}^{dr} + \delta_{cmos}^t,$$

де $\Delta\varphi$ – похибка вимірювання кутів пропонованої ППСВК; $\Delta\varphi_I$ – інструментальна похибка; $\Delta\varphi_M$ – методична похибка повірки гоніометра; $\Delta\varphi_S$ – суб’єктивна похибка оператора; $t_1, t_\varphi, t_{2\pi}$ – моменти часу початку вимірювання, повороту на вимірюваний кут φ , та кут 2π відповідно, що зафіксовані автоколіматором; $K(t)$ – масштабний коефіцієнт КЛ, що використовується в якості датчика кута; ω_Σ – кутова швидкість, що впливає на гоніометр, та обумовлюється кутовими швидкостями обертової платформи ($\overline{\omega(t)}$), Землі ($\overline{\omega_3}$) і основи обертової платформи відносно Землі ($\overline{\omega_{bas}(t)}$); $\alpha(t)$ – кут між віссю обертання обертового пристрою і віссю чутливості гоніометра; $K_{-1}(t), \omega_0(t)$ – нелінійність і зсув нуля вихідної характеристики КЛ відповідно; N_{q1}, N_{q2} – шум і дискретність квантування сигналу; $\Delta\varphi_{cal}$ – похибка обчислень значень вимірюваного кута в ЕОМ; $\Delta\varphi_{cmos}$ – похибка фоточутливої КМОП-матриці, обумовлена фотонним та тепловим шумом; φ – дійсне значення вимірюваного кута.

Вплив нестабільності швидкості обертання Землі навколо своєї осі на точність вимірювання пропонованої ППСВК. В пропонованій ППСВК в якості прецизійного датчика кута використовується КЛ 3.970.029 розроблений ЦКБ “Арсенал” спільно з кафедрою приладобудування Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”.

При функціонуванні КЛ спостерігається нестабільність його параметрів – відбувається дрейф нуля ω_0 вихідної характеристики та дрейф K_1 масштабного коефіцієнта. Розрахункове значення масштабного коефіцієнта становить $K = 1,03 \cdot 10^{-5}$ при довжині сторони резонатора виконаного у вигляді рівностороннього трикутника 22,7 см та довжині хвилі $\lambda = 0,6328$ мкм. Проте під час функціонування КЛ відбувається дрейф масштабного коефіцієнта, що призводить до зміни його точності. В ідеальному випадку масштабний коефіцієнт K змінюється лінійно, але в реальних умовах на лінійні зміни накладаються конструктивно-технологічні флуктуації, що мають систематичний характер та усуваються відповідними конструктивними доопрацюваннями, та флуктуації обумовлені фізичною природою процесів та явищ, що виникають при функціонуванні КЛ які носять випадковий характер. До останніх належить нестабільність швидкості обертання Землі ω_3 навколо своєї осі, яка як відомо із багатьох досліджень науковців є нестабільною $\omega_3 \neq const$ та змінюється стрибкоподібно через вплив різних флуктуацій, викликаних планетарними силами – дрейфом магнітних полюсів, теплового градієнту, нестабільністю осі обертання. Кутова швидкість обертання Землі змінюється впродовж доби протягом всього року. Відома теорія дозволяє обчислювати коливання швидкості обертання Землі на будь-який інтервал часу.

Взаємозв’язок між швидкістю обертання Землі ω_3 та параметрами КЛ (дрейфом масштабного коефіцієнту K та нуля ω_0) можна показати

взаємозв'язаними виразами наступним чином:

$$\omega_0 = \frac{N}{T} \cdot \frac{1,296 \cdot 10^6}{2\pi K} - \omega_3 \cdot \cos(n \cdot \omega_3) \Rightarrow K = \frac{N}{T(\omega_0 + \omega_3 \cdot \cos(n \cdot \omega_3))} \cdot \frac{1,296 \cdot 10^6}{2\pi K}, \quad (15)$$

де ω_0 – постійна дрейфу нуля вихідної характеристики; N – кількість періодів вихідного сигналу КЛ, отримане при додаванні за час T , $N = \frac{1}{2\pi} \int_0^T \Delta \omega dt$; ω_3 – швидкість обертання Землі навколо своєї осі; n – вектор вимірювальної осі КЛ; K – масштабний коефіцієнт, що визначається за відомою формулою $K = \frac{4S}{\lambda L} = \frac{2\pi R_{ef}}{\lambda/2}$, де S – площа контуру резонатора; L – периметр резонатора; λ – довжина хвилі; R_{ef} – довжина кола вписаного в оптичний контур резонатора КЛ, $R_{ef} = \frac{2S}{L}$; $\lambda/2$ – відстань між вузлами стоячої хвилі.

Із виразу (15) видно, що за умови $\omega_3 \neq const$ показники K та ω_0 є нестабільними величинами $K \neq const$, $\omega_0 \neq const$:

$$\omega_3 \neq const \Rightarrow \begin{cases} \omega_0 = \text{var}; \\ K = \text{var}. \end{cases} \quad (16)$$

Випадковий характер змін швидкості обертання Землі, які частково визначають дрейф нуля ω_0 та масштабного коефіцієнту K КЛ пропонуваної ППСВК вказує на випадковий характер цієї складової інструментальної похибки $\Delta \varphi_i$ (див. вираз (14)).

Фоточутлива КМОП-матриця, що використовується у пропонуваній ППСВК в якості аналізатору сигналу від автоколіматора в діапазоні випромінювань від 400 нм до 1000 нм, має похибку δ_{cmos} , обумовлену шумами, що мають випадковий характер. Відомим параметром яким описують відносну величину шуму у сигналі є коефіцієнт шуму, що визначається як відношення величини корисного сигналу S до шуму F , вимірюється в децибелах та має логарифмічний масштаб величини:

$$S / F = 10 \log_{10} F. \quad (17)$$

У фоточутливій КМОП-матриці виникають шуми найсуттєвішими з яких для пропонуваної ППСВК є фотонний (дробовий) шум та шум теплового сигналу.

Фотонний (дробовий) шум виникає в наслідок дискретності природи світлового випромінювання. Він проявляється як випадкові флуктуації напруг U_{dr} та струмів у фоточутливих елементах (пікселях) матриці, що визначають похибку δ_{cmos}^{dr} від дробового ефекту або фотонного шуму:

$$\delta_{cmos}^{dr} = f(U_{dr}), \quad (18)$$

де U_{dr} – флуктуаційні напруги, що виникають через дробовий ефект, середне

квадратичне значення яких визначаються за виразом $U_{dr}^2 = 2qiR^2\Delta f$, де R – опір, Ом; Δf – інтервал (смуга) частот в межах якого реєструється сила фотоструму, Гц; q – заряд електрона, $q=1,6\cdot 10^{-19}$ Кл; i – величина струму, А.

Переміщення кожного носія заряду (електрона) КМОП-матриці супроводжується стрибком напруги в електричному колі. При швидкості зчитування зарядів до 500 елементів в с., на пікселі матриці потрапляє різна кількість фотонів, яка підпорядковується розподіленню Пуассона.

Шум темного сигналу (тепловий шум) виникає внаслідок термоелектронної емісії. Тепловий шум виникає тільки в провідниках з активним опором (у провідниках з реактивним опором – ємностях та індуктивностях тепловий шум не виникає) та пов'язаний із хаотичним рухом рухомих носіїв заряду. В наслідок цього з'являються флуктуації напруги U_t , що визначають величину похибки δ_{cmos}^t від теплового шуму:

$$\delta_{cmos}^t = f(U_t), \quad (19)$$

де U_t – флуктуаційна напруга при тепловому русі зарядів, середнє квадратичне значення якої визначається за відомою формулою $U_t^2 = 4kTR\Delta f$, де k – постійна Больцмана, $k=1,38\cdot 10^{-23}$ Дж/К; T – абсолютна температура T , К; R – опір, Ом; Δf – інтервал (смуга) частот, Гц.

Відомо, що тепловий шум, який визначається флуктуаційною напругою U_t в постійній смузі частот при $\Delta f = \text{const}$ має лінійну залежність від абсолютної температури T . Даний факт дозволяє зменшувати складову δ_{cmos}^t похибки δ_{cmos} , КМОП-матриці від теплового шуму відповідно до наступного формалізованого виразу:

$$T \rightarrow 0 \Rightarrow U_t \rightarrow 0 : U_t = f(T). \quad (20)$$

Опорною величиною абсолютної температури T щодо джерела теплового шуму у КМОП-матриці є значення 290 К або 17°C. Тому при експлуатації пропонованої ППСВК для зменшення U_t температура T повинна бути близькою до 17°C.

Величина корисного сигналу КМОП-матриці визначається за формулою:

$$S = \frac{U_s^2}{U_{dr}^2 + U_t^2}, \quad (21)$$

де U_s^2 – величина напруги на виході КМОП матриці.

Таким чином величина похибки δ_{cmos} , що вноситься КМОП-матрицею, має дві складові: похибку від дробового ефекту або фотонного шуму δ_{cmos}^{dr} та похибку від теплового шуму δ_{cmos}^t :

$$\delta_{cmos} = \delta_{cmos}^{dr} + \delta_{cmos}^t. \quad (22)$$

Фізична природа складових похибки δ_{cmos} вказує на її випадковий характер.

Таким чином складовими інструментальної похибки $\Delta\varphi_I$ (див. вираз (14)) пропонованої ППСВК є систематична та випадкові складові. Систематична складова інструментальної похибки $\Delta\varphi_I$ відносно легко усувається в результаті використання при побудові пропонованої ППСВК складових, що мають стабільні параметри (пропонується використовувати матрицю з розмірністю пікселів $1,0 \times 1,0$ мкм, наприклад, OV16880 або OV20880 виробництва OmniVision (США), завдяки високій роздільній здатності елементів матриць та ортогональній структурі КМОП-матриці в цілому, досягається похибка вимірювання $0,1''$). Також в якості прецизійного датчика кута пропонується використовувати КЛ 3.970.029 виробництва ЦКБ “Арсенал” (Україна), що має високу точність та обумовлює похибку не більше $0,1''$).

Випадкова складова інструментальної похибки $\Delta\varphi_I$ (див. вираз (14)) частково визначається похибками δ_{cmos}^{dr} та δ_{cmos}' , що складають похибку $\Delta\varphi_{cmos}$ КМОП-матриці та виникають від дробового ефекту або фотонного шуму відповідно, а також похибка, що вноситься нестабільністю швидкості обертання Землі навколо своєї осі ($\overline{\omega_3}$) та частково визначає дрейф нуля ω_0 і масштабного коефіцієнту K КЛ. Через випадковий характер вказаних похибок усунути інструментальну похибку $\Delta\varphi_I$ пропонованої ППСВК неможливо. Проте вона зменшена за рахунок проведення науково обґрунтованої кількості (див. далі) багаторазових вимірювань та фільтрації вихідного сигналу.

З метою обґрунтованого визначення необхідної кількості спостережень при багаторазових вимірюваннях, що корелює із заданою точністю і очевидним чином визначає швидкодію вимірювань, та використовується при нормуванні випадкових складових похибок вимірювання кутів, в даному розділі розроблено підхід щодо визначення необхідної кількості спостережень при багаторазових вимірюваннях, а також методику розрахунку необхідної кількості вимірювань, що є достатньою для досягнення заданої точності при нормуванні випадкових складових похибок вимірювання ППСВК. Пропонована методика є основою розробленого підходу щодо визначення кількості вимірювань (рис. 5). Необхідність розробки вказаних підходу та методики обумовлюється тим, що при проведенні багаторазових вимірювань виникають наступні хибності: перша полягає в тому, що проведення недостатньої кількості вимірювань призводить до недостатньо високої точності, а друга полягає в тому, що надлишкова кількість вимірювань призводить до збільшення тривалості процесу вимірювання.

Методика може бути реалізована за наступною послідовністю етапів. На кожному етапі пропонованої методики передбачається розв'язання низки задач. При цьому результати, отримані на кожному з попередніх етапів, є вихідними даними для наступного етапу.

I етап – формулювання мети експерименту – здійснюється постановка задачі та формулюється мета проведення експерименту. Задача полягає в тому, що необхідно визначити оптимальну (тобто необхідну та достатню) кількість повторів вимірювань для досягнення максимальної точності при заданій довірчій ймовірності (надійності) і, як результат, зменшити тривалість процедури вимірювання.

II етап – аналіз досліджуваної ППСВК та формування попередньої моделі похибки вимірювання. Змістом цього етапу є проведення аналізу досліджуваної ППСВК з попереднім формуванням моделі похибки вимірювання за виразом (14).

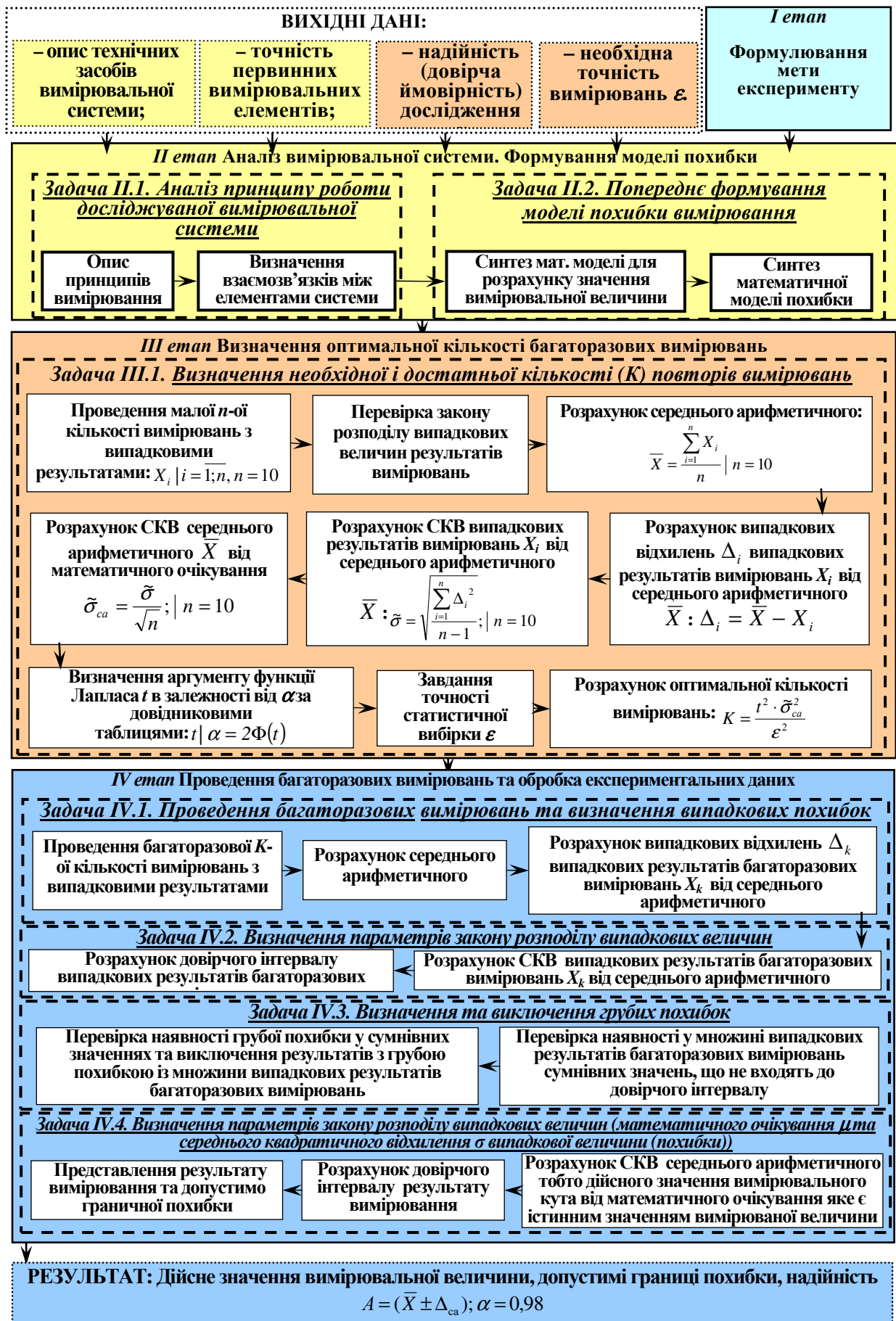


Рис. 5. Схема розробленої методики розрахунку необхідної кількості спостережень при багаторазових вимірюваннях, що є достатньою для забезпечення заданої точності

III етап – визначення оптимальної кількості багаторазових вимірювань. На цьому етапі здійснюється розрахунок необхідної і достатньої кількості повторів спостережень / вимірювань / дослідів, тобто об'єму вибірки розміром K . Застосовуються методи математичної статистики та теорії ймовірності для забезпечення високої точності та достовірності отриманих результатів при мінімальних витратах ресурсів, перш за все часових.

Об'єм вибірки K залежить від співвідношення об'ємів генеральної сукупності досліджуваної величини та вибірки, від точності ε та довірчої ймовірності (надійності) α , з якими необхідно провести ймовірнісний аналіз величини випадкової складової похибки вимірювання ППСВК. α в приладо- та машинобудуванні, як правило, приймають в інтервалі від 0,95 до 0,99.

Об'єм вибірки K при різних співвідношеннях об'ємів генеральної сукупності та самої вибірки визначають за відомою формулою:

$$K = \frac{t^2 \cdot \sigma^2}{\varepsilon^2}, \quad (23)$$

де t – аргумент функції Лапласа, що визначається за довідниковими таблицями в залежності від надійності $\alpha = 2\Phi(t)$; σ – середнє квадратичне відхилення малої вибірки об'ємом не більше 10 значень; ε – точність статистичної вибірки.

Необхідна і достатня кількість вимірювань для визначення випадкової складової похибки вимірювання пропонованою ППСВК визначається за наступною послідовністю кроків.

Крок 1. Проводиться порівняно мала кількість (n) вимірювань. Об'єм малої вибірки повинен становити не більше 10 значень.

Крок 2. Здійснюється перевірка закону розподілення випадкових величин порівняно малої вибірки та параметрів закону розподілу – математичного очікування μ та середнього квадратичного відхилення σ випадкової величини (похибки).

Крок 3. За довідниковими таблицями в залежності від довірчої ймовірності (надійності) $\alpha = 2\Phi(t)$ визначається аргумент функції Лапласа t . Причому довірча ймовірність (надійність) α відповідно до рекомендацій наданих в літературі може бути прийнята в інтервалі від 0,95 до 0,99.

Крок 4. Задається точність статистичної вибірки ε .

Крок 5. Розраховується необхідна і достатня кількість вимірювань за виразом (23). Наприклад, для вимірювання величини плоского кута 24-гранної призми $K = 37$.

IV етап – проведення багаторазових вимірювань та обробка експериментальних даних. На цьому етапі відбувається проведення вимірювання, визначення середнього квадратичного відхилення, наявності грубих похибок, результату вимірювання тощо, а також інтерпретація отриманих результатів та корекція моделі похибки (за необхідністю).

Ймовірнісний аналіз отриманої вибірки здійснюється за наступною послідовністю.

Визначення параметрів закону розподілу випадкових величин (математичного очікування μ та середнього квадратичного відхилення σ випадкової величини (похибки))

Крок 1. Статистичні дослідження полягають у статистичному аналізі вибірки, який проводиться шляхом визначення максимального та мінімального значень

вимірюваного кута з врахуванням похибок.

Крок 2. Визначення параметрів законів розподілу:

– *математичне очікування* μ являє собою істинне значення вимірюваного кута та може бути визначене при кількості вимірювань $K \rightarrow \infty$, тому приймають, що $\bar{x} \approx \mu$.

– *середнє квадратичне відхилення* σ випадкової величини від дійсного значення вимірюваного кута:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K \Delta_k^2}{K-1}}, \quad (24)$$

де Δ_k – випадкове відхилення k -го результату X_k багаторазових вимірювань від середнього арифметичного \bar{X} , $\Delta_k = \bar{X} - X_k$; K – кількість вимірювань (об'єм вибірки), $K = 37$.

– *середнє квадратичне відхилення* σ_{ca} дійсного значення вимірюваного кута від істинного значення, тобто середнього арифметичного від математичного очікування:

$$\tilde{\sigma}_{ca} = \frac{\tilde{\sigma}}{\sqrt{K}}, \quad (25)$$

де K – кількість вимірювань (об'єм вибірки), $K = 37$.

Визначення та виключення грубих похибок. Грубі похибки або промахи суттєво перевищують очікувану в даних умовах похибку та спотворюють результат вимірювання, тому підлягають виключенню із вибірки. Для визначення та наступного виключення грубих похибок застосовуються математичні методи за наступною послідовністю кроків.

Крок 1. Обчислюється довірчий інтервал Δ_{X_k} результатів багаторазових вимірювань X_k :

$$\Delta_{X_k} = \bar{X} \pm K_L \cdot \tilde{\sigma}, \quad (26)$$

де \bar{X} – середнє арифметичне результатів багаторазових вимірювань; K_L – значення функції Лапласа $P\{|t| < K_L\} = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^{K_L} e^{-\frac{y^2}{2}} dy$, що визначається за довідниковими таблицями в залежності від довірчої ймовірності (надійності) α , яка відповідно до наданих в літературі рекомендацій прийнята рівною 0,98.

$$\varphi_{ca} = \bar{X} = \frac{\sum_{k=1}^K X_k}{K}, \quad (27)$$

де φ_{ca} – дійсне значення кута; \bar{X} – середнє арифметичне результатів багаторазових вимірювань; X_k – k -й результат багаторазових вимірювань; K – об'єм вибірки (кількість вимірювань), $K = 37$.

Крок 2. Перевірка наявності у множині результатів багаторазових вимірювань

X_k сумнівних значень X'_k , що не входять до довірчого інтервалу Δ_{X_k} .

Крок 3. Перевірка наявності грубої похибки у сумнівних значеннях X'_k . При відсутності у сумнівному значенні X'_k грубої похибки виконується умова:

$$\begin{aligned} |\bar{X} - X'_k| &< \Delta_\Gamma, \\ \Delta_\Gamma &= K_\Gamma \cdot \tilde{\sigma}, \end{aligned} \quad (28)$$

де K_Γ – коефіцієнт для визначення границь грубих похибок Δ_Γ . K_Γ визначається за таблицями в залежності від довірчої ймовірності (надійності) α та об'єму вибірки K ; σ – середнє квадратичне відхилення випадкової величини від дійсного значення вимірюваного кута.

Значення X'_k для яких не виконується умова (28) містять грубу похибку та виключаються із вибірки. Після цього уточнюється дійсне значення вимірюваного кута, а також σ та σ_{ca} .

Представлення результату вимірювання та допустимої граничної похибки.

Дана задача вирішується за наступну послідовність кроків.

Крок 1. Розрахунок довірчого інтервалу Δ_{ca} дійсного значення вимірюваного кута:

$$\Delta_{ca} = \pm K_{ca} \cdot \tilde{\sigma}_{ca}, \quad (29)$$

де K_{ca} – коефіцієнт Ст'юдента $P\{|t| < t_s\} = 2 \int_0^{t_s} f(t, n) dt$, що визначається за

довідниковими таблицями в залежності від довірчої ймовірності (надійності) α та об'єму вибірки K ; σ_{ca} – середнє квадратичне відхилення дійсного значення вимірюваного кута від його істинного значення.

Крок 2. Результат вимірювання з нормованим значенням допустимо граничної випадкової похибки представляється у вигляді наступного виразу:

$$\varphi = A = (\bar{X} \pm \Delta_{ca}); \alpha = 0,98, \quad (30)$$

де \bar{X} – середнє арифметичне результатів багаторазових вимірювань або дійсне значення вимірюваного кута; Δ_{ca} – довірчий інтервал; α – довірча ймовірність (надійність) з якою проводився ймовірнісний аналіз величини випадкової складової похибки вимірювання. За рекомендаціями літературних джерел α прийнято рівною 0,98.

Експериментальним моделюванням на комп'ютері для базового прикладу отриманий результат вимірювання величини плоского кута 24-гранної призми становить $\varphi = 164^\circ 59' (59,400 \pm 0,079)''$ при заданій точності статистичної вибірки 0,01'' та довірчій ймовірності (надійності) 0,98. Розрахунковий час проведення вимірювання для $K=37$ становить приблизно 6 годин.

Для оцінки ефективності запропонованої методики використовувались відомі наукові результати, отримані без обґрунтованого визначення необхідної та достатньої кількості вимірювань. Так вимірювання плоского кута 24-гранної призми проводилося за 50 прийомів протягом 8 годин. Для кількості прийомів вимірювань $N = 50$ точність складає приблизно 0,073''.

Експериментальним моделюванням на комп'ютері підтверджено ефективність застосування розробленого підходу за методикою розрахунку необхідної та достатньої кількості вимірювань. Показано, що розмір отриманої вибірки є

достатнім для забезпечення високої точності отриманих результатів. При цьому розраховано, що час проведення експерименту скорочується на 25 % порівняно із відомою роботою.

Графічна інтерпретація результатів експериментальних досліджень ефективності пропонованого підходу щодо визначення кількості вимірювань за пропонованою методикою розрахунку необхідної та достатньої кількості вимірювань кутів ППСВК приведені на рис. 6.

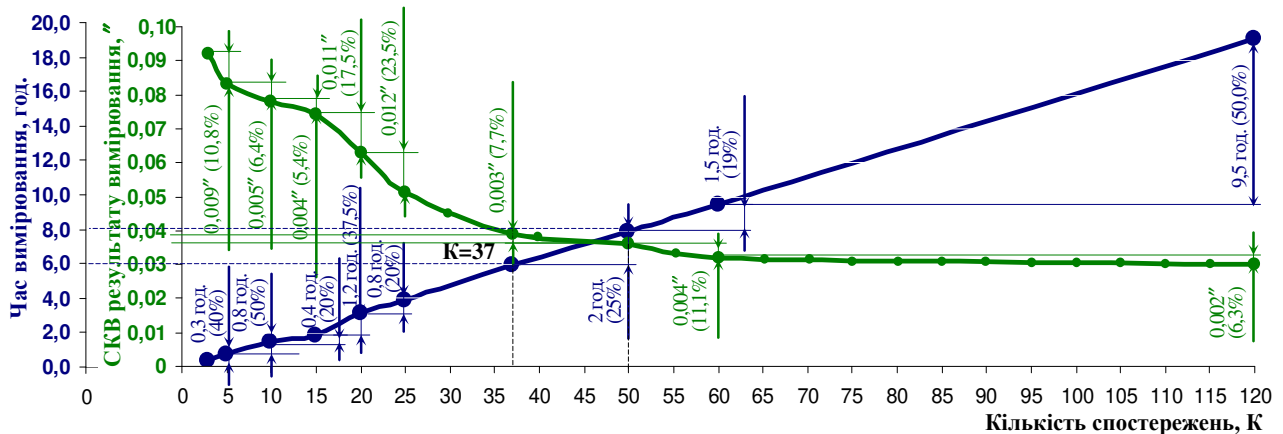


Рис. 6. Графічна інтерпретація результатів застосування пропонованого підходу визначення кількості вимірювань за методикою розрахунку необхідної та достатньої кількості вимірювань

Таким чином при застосуванні пропонованого підходу та методики щодо визначення необхідної та достатньої кількості вимірювань кутів пропонованою ППСВК, отримується вибірка, розмір якої є достатнім для забезпечення високої точності (при заданій точності статистичної вибірки 0,01") отримуваних результатів вимірювання. При цьому час проведення експерименту суттєво скорочується (на 25 %) порівняно із відомими результатами наукових досліджень.

Таким чином можна стверджувати, що запропонована методика дозволила обґрунтувати кількість спостережень при багаторазових вимірюваннях, зменшити їх кількість приблизно у 1,4 рази порівняно із відомими науковими результатами (тобто із 50 до 37 вимірювань), в результаті чого підвищено швидкодію у 1,3 рази або на 25 % порівняно із відомими дослідженнями при вимірюванні кутів з позитивним декрементом точності.

У **четвертому розділі** розроблено ШНМ для функціонування пропонованої ППСВК з огляду на необхідність автоматичного аналізу інформації та її обробки для підвищення точності та швидкодії вимірювання кутів. Зокрема розроблено ШНМ для автоматичного розпізнавання систематичних та випадкових складових похибок вимірювання кутів (рис. 7), що використовується на етапі аналізу та обробки вимірювальної інформації та виконує експрес-аналіз складових похибок вимірювання за принципом декомпозиції.

Відомий метод визначення складових похибок вимірювання за принципом їх декомпозиції із застосуванням дисперсійного критерію Фішера є досить трудомістким та вимагає порівняно значних витрат часу і реалізується за 15 кроків. При визначенні складових похибок вимірювання із застосуванням дисперсійного критерію Фішера виконується 223 математичних операції, зокрема 114 операцій додавання, 46 – віднімання, 46 – множення та 17 – ділення.

З врахуванням того, що для підвищення точності при вимірюваннях проводять як правило багаторазові спостереження, кількість K результатів яких може бути

досить великою, очевидним є значне збільшення часу вимірювань.

ШНМ автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання являє собою ШНМ прямого поширення з налагоджуваною структурою нейронів за моделлю багатошарового перцептрона, що навчалась за методом “навчання з вчителем” та алгоритмом back propagation – зворотного розповсюдження помилки. В якості функції активації нейронів обрано сигмоїду (функцію Фермі / логістичну функцію). За оцінюючий функціонал якості навчання ШНМ прийнято величину похибки E , що повинна дорівнювати або бути меншою 0,05 або 5 %.

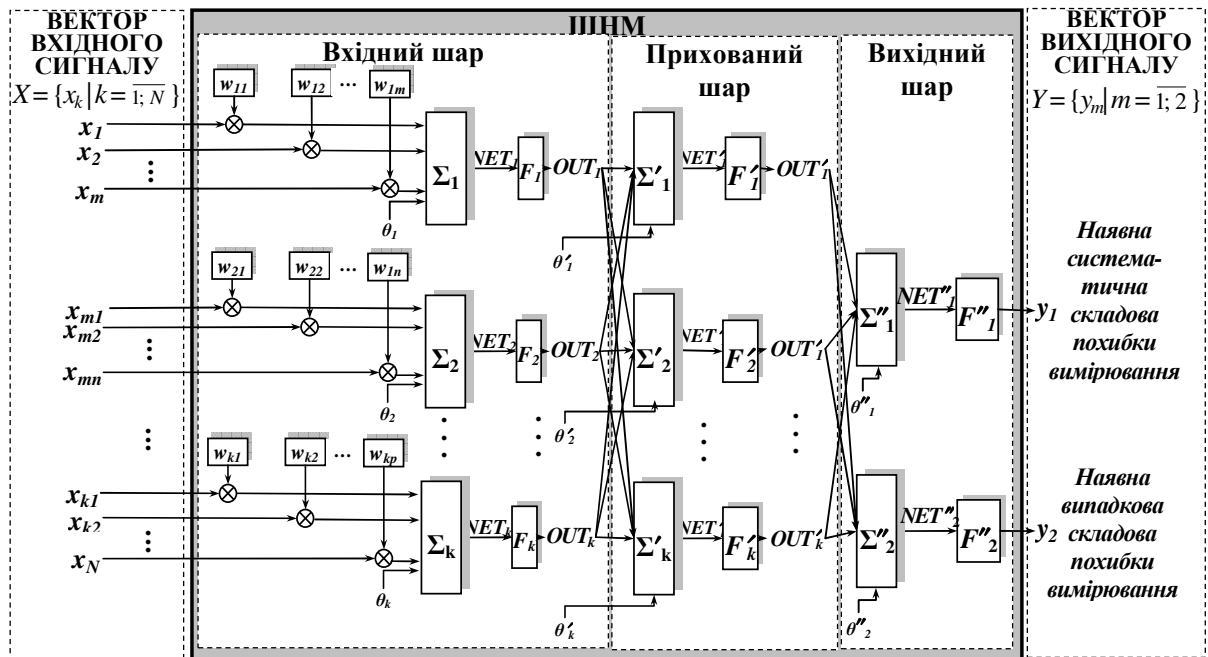


Рис. 7. Схематична модель розробленої ШНМ автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання

Коротко сутність роботи розробленої ШНМ автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання полягає в наступному. Вимірювальна інформація від підсистеми ПВК (зокрема КМОП-матриці) пропонованої ППСВК подається на вхід ШНМ в якій здійснюється їх обробка та формування вихідного сигналу про склад похибок вимірювання у вигляді вектора Y цифрових сигналів: $Y = \{y_m | m = \overline{1; 2}\}$. Наявність максимального значення цифрового сигналу на виході ШНМ, який умовно позначений y_1 , відповідає наявності у результатах вимірювання систематичної складової похибки вимірювання, а максимальне значення на виході ШНМ, що умовно позначений y_2 – випадковій складовій похибки вимірювання. На рис. 8 схематично проілюстровано функціональну взаємодію розробленої ШНМ автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання з КМОП-матрицею пропонованої ППСВК.

Вихідний сигнал ШНМ передається на ЕОМ, в якій здійснюється автоматизована обробка вимірювальної інформації, зокрема, нормування складових похибок вимірювання за відомими методами з представленням результатів у зручній для користувача формі.

Практична реалізація ШНМ автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання здійснена з використанням нейроімітатора Neural Analyzer аналітичного пакету Deductor Professional (Lite-версії), що інтегрований як спеціалізований програмний додаток в операційну систему ЕОМ.

Підвищення швидкодії вимірювання здійснюється на етапі обробки вимірювальної інформації за рахунок того, що в ШНМ реалізовано метод

паралельної обробки даних, за яким інформація, яка подається на ШНМ, обробляється вся одночасно, а не послідовно як в аналітично-розрахунковому методі за дисперсійним критерієм Фішера.

При цьому час обробки інформації залежить як від технічних характеристик ШНМ (від тактової частоти ЕОМ, розрядності, кількості нейронів прихованого шару ШНМ тощо), так і від розмірності вимірювальної інформації, що обумовлюється необхідною кількістю вимірювань. Для розглянутих в роботі прикладів, застосування ШНМ дозволило здійснити автоматичне визначення складових похибки вимірювання за 2 с.

Підвищення точності здійснюється за рахунок виключення суб'єктивних помилок оператора на етапі аналізу вимірювальної інформації.

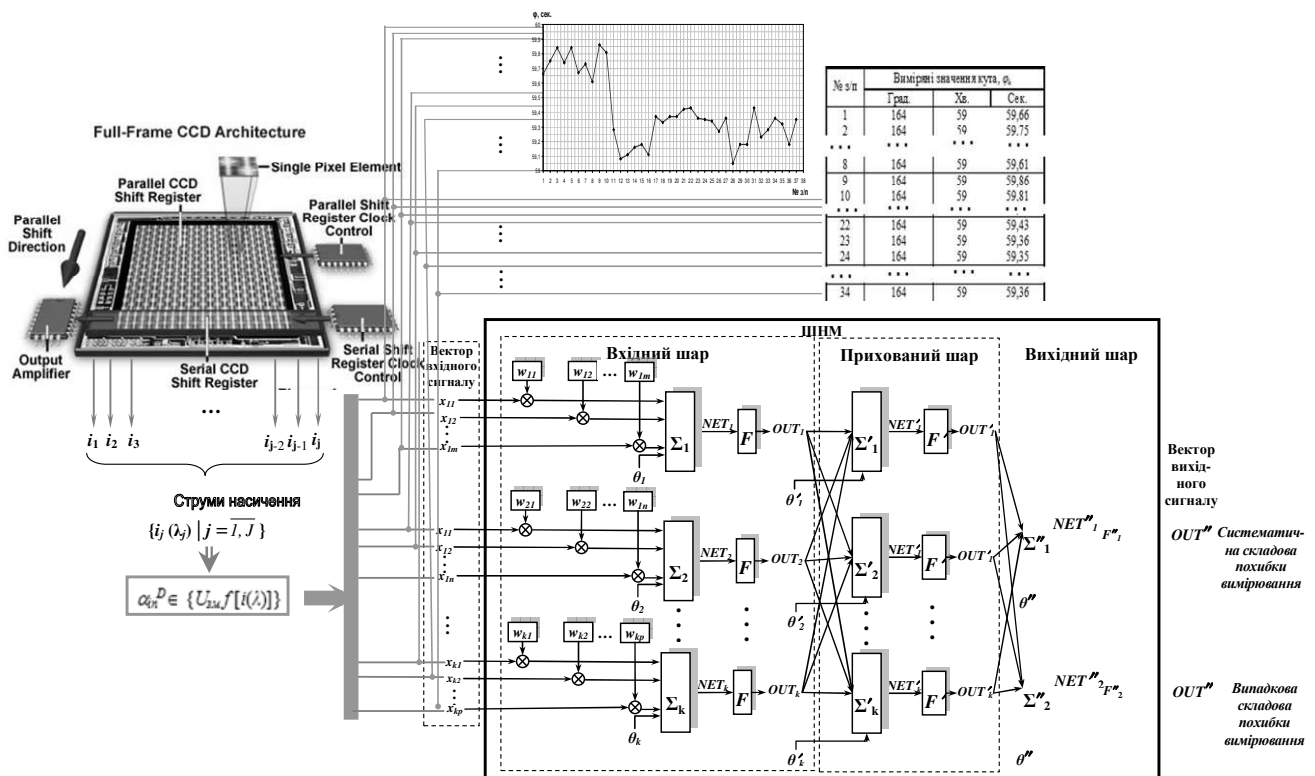


Рис. 8. Схематичне представлення функціональної взаємодії розробленого модуля ШНМ з КМОП-матрицею пропонуваної ППСВК при автоматичному розпізнаванні складових похибок вимірювання

Використання КМОП-матриці у складі пропонуваної ППСВК дозволяє значно розширити її функціональні можливості та виконувати аналіз спектрального розподілу хімічних речовин металовмісних матеріалів. Для реалізації цієї можливості розроблено ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних речовин (рис. 9), що використовується у пропонуваній ППСВК для експрес-аналізу інтенсивностей спектрального розподілу хімічних речовин при визначення їх вмісту у складі металовмісних матеріалів.

Пропонувана ШНМ виконує операцію розпізнавання хімічних елементів за їх спектральним розподілом, що формується на поверхні КМОП-матриці. Вхідні сигнали ШНМ змістовно відображають інтенсивність відбитого світлового випромінювання, що залежить від хімічного складу металів. На вхід ШНМ подається множина струмів насичення фотоелементів КМОП-матриці при опроміненні їх світлом із довжинами хвиль λ_i : $\{i_i(\lambda_i) \mid i \in \{C, P, S, Mn, Si, Cr, Ni, Cu,$

Nb, N, Al, Ti, V, Mo, W, Co, B, Fe, ...}, де C, P, S, Mn, Si, Cr, Ni, Cu, Nb, N, Al, Ti, V, Mo, W, Co, B, Fe – умовне позначення деяких елементів, що можуть міститись у матеріалі ОВ. Множина струмів насичення, відповідно до вимог технології ШНМ, формує вхідний вектор, що подається на входи ШНМ (рис. 10).

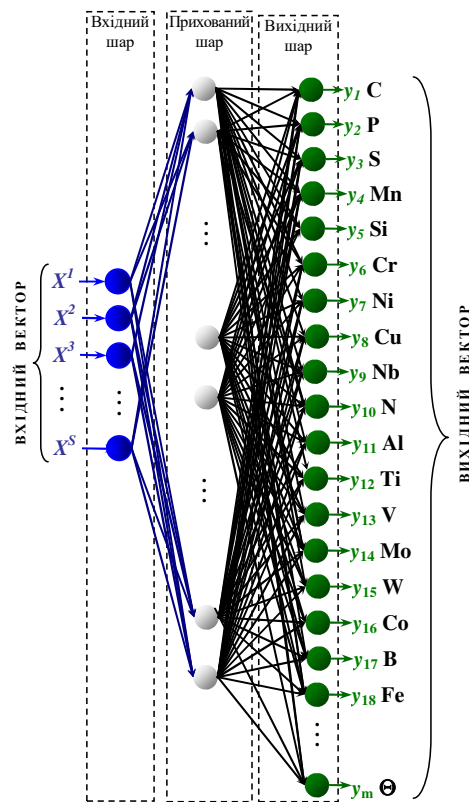


Рис. 9. Схематична модель розробленої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів у металовмісних матеріалах: вхідних нейронів 256, прихованих нейронів 275, вихідних нейронів 62

Розмірність вхідного вектору та кількість нейронів на вході пропонуваної ШНМ, що призначені для приймання вхідної інформації від КМОП-матриці, обумовлюється роздільною здатністю останньої. Так $X = \{x_s \mid s = \overline{1; S}\}$, де $S = c \times r$, де c – кількість стовпчиків матриці, r – кількість рядків матриці. Наприклад, при застосуванні КМОП-матриці OV16880 або OV20880 виробництва OmniVision (США) S становить 307500 пікселів. На вхід пропонуваної ШНМ подаються попередньо нормалізовані значення інтенсивностей спектрального розподілу, що містить 256 елементів, тому кількість вхідних нейронів становить 256.

В результаті роботи розробленої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів формується цифровий сигнал, що відображає хімічний склад досліджуваного ОВ у вигляді вектора Y цифрових сигналів: $Y = \{y_m \mid m = \overline{1; M}\}$, де M – кількість хімічних елементів, що можуть бути визначені. Максимальне значення y_m на m -му відповідному виході ШНМ відповідає наявності у складі ОВ певного хімічного елемента (рис. 9, рис. 10).

Розмірність вихідного шару пропонуваної ШНМ становить 62 нейрони, відповідно до переліку хімічних елементів, що можуть міститися в металовмісних речовинах. Розмірність прихованого шару визначено емпірично за результатами навчання ШНМ та становить 275 нейронів.

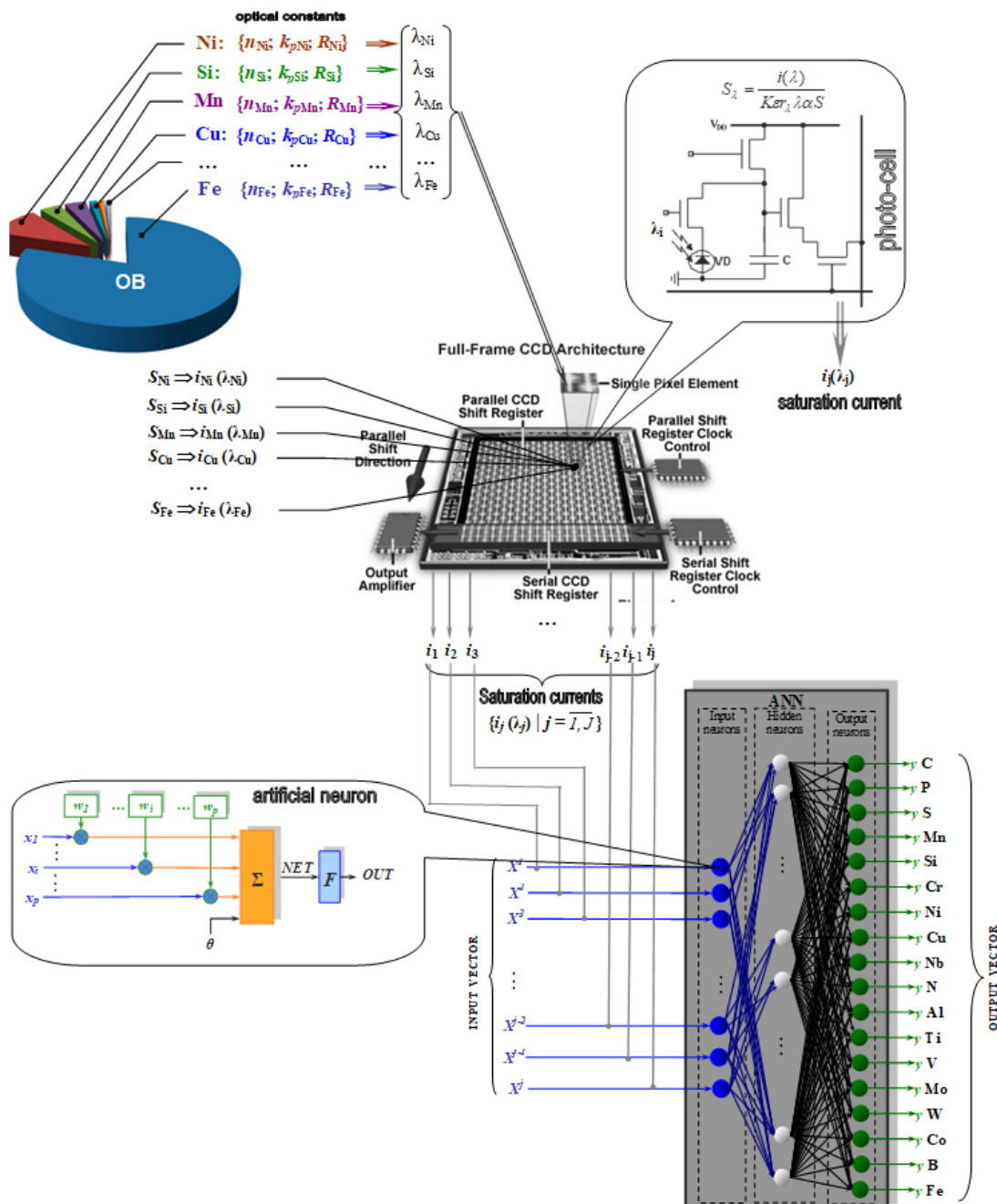


Рис. 10. Схематичне представлення функціональної взаємодії розробленої ШНМ з КМОП-матрицею запропонованої ППСВК при автоматизованому аналізі інтенсивностей спектрального розподілу для визначення хімічного складу металовмісних матеріалів

Рішення про наявність того чи іншого хімічного елементу у металі приймається так званим інтерпретатором відповіді „переможець отримує все”, в якому кількість вихідних сигналів відповідає кількості варіантів відповіді, а номер відповіді відповідає номеру нейрона, що видав максимальний сигнал на виході. Тобто при визначенні хімічного складу металовмісного матеріалу, на відповідних виходах ШНМ отримані максимальні значення сигналів, що відповідають наявності відповідних хімічних елементів. В якості оцінюючого функціоналу навчання ШНМ прийнято величину похибки E , що не повинна перевищувати 0,05 або 5 %.

Проведено комп'ютерне моделювання роботи розроблених ШНМ. Отримані результати вказують на їх високу швидкість (робота в режимі реального часу за 2 та 2,5 с. відповідно) та правильну (величина оцінюючого функціоналу відповідає прийнятому значенню, тобто $E \leq 5\%$ (див. рис. 11, рис. 12)) роботу.

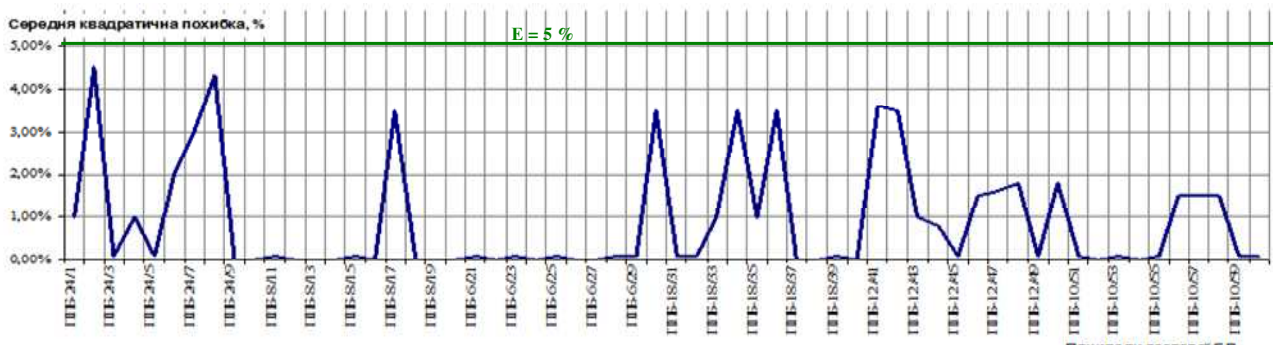


Рис. 11. Графічне представлення величини середньої квадратичної похибки E при функціонуванні пропонованої ШНМ автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання для умови $E \leq 5\%$

Витрачений ШНМ час на обробку вимірювальної інформації становить 2 с та 2,5 с відповідно, що відповідає режиму реального часу та є значно меншим порівняно із часом, що витрачався при застосуванні інших методів для визначення складових похибок вимірювання, зокрема при застосуванні дисперсійного аналізу за критерієм Фішера.

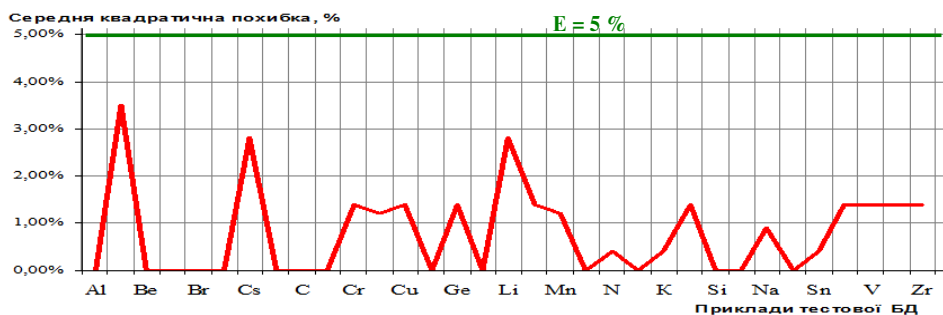


Рис. 12. Графічне представлення величини середньої квадратичної похибки E при функціонуванні розробленої ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів для умови $E \leq 5\%$

Приведене дозволяє стверджувати, що застосування розроблених ШНМ підвищує швидкість пропонованої ППСВК в цілому, а також сприяє частковому підвищенню точності в результаті виключення суб'єктивної похибки за рахунок повної автоматизації процесу обробки вимірювальної інформації. Таким чином швидкість вимірювання кутів пропованою ППСВК збільшено у 1,3 рази порівняно із результатами отриманими з використанням критерію Фішера.

У п'ятому розділі розвинуто метод ковзного середнього щодо підвищення якості амплітуди вихідних сигналів, зокрема для згладжування амплітуди випадкових складових похибок у вимірювальному сигналі та підвищення точності

вимірювання кутів запропованою ППСВК в цілому. В роботі програмно реалізовано фільтр Калмана, зокрема його окремий випадок – метод ковзного середнього. Для реалізації автоматизованого функціонування запропонованої ППСВК розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення (ПЗ), застосування якого дозволило пришвидшити процес вимірювання і обробки інформації, а також забезпечити підвищення швидкодії та точності кінцевих результатів вимірювання.

Графічне представлення результатів при багаторазових вимірюваннях кутів, для базового прикладу – 24-гранної призми, до фільтрації та після фільтрації за методом ковзного середнього приведено на рис. 13 – рис. 15 відповідно.

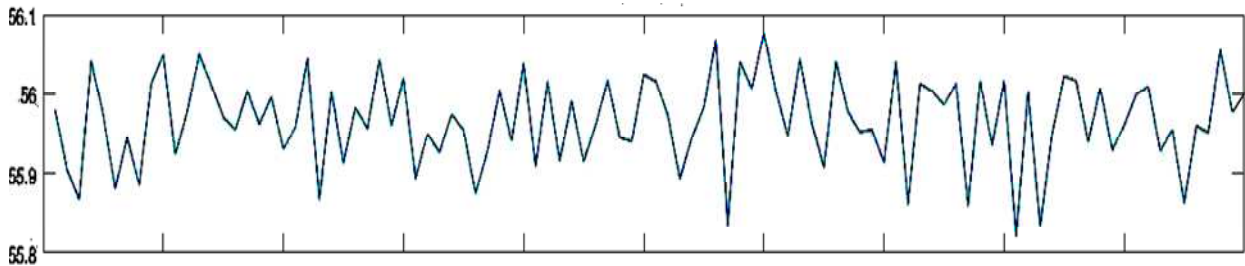


Рис. 13. Спотворення результатів спостереження при багаторазових вимірюваннях кутів через наявність випадкових похибок до фільтрації

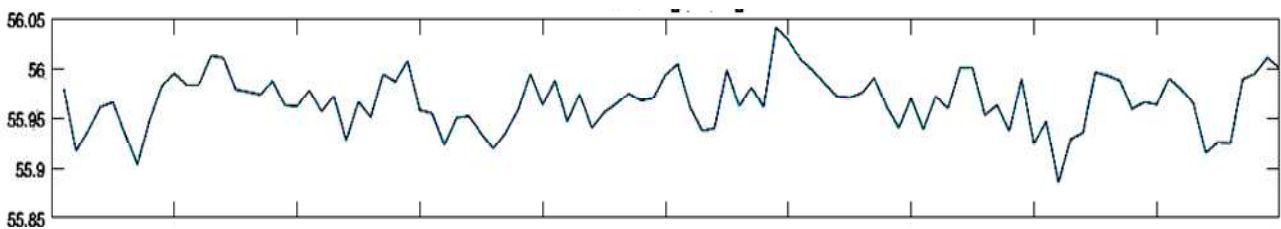


Рис. 14. Графік зміни результатів спостереження після першого етапу фільтрації

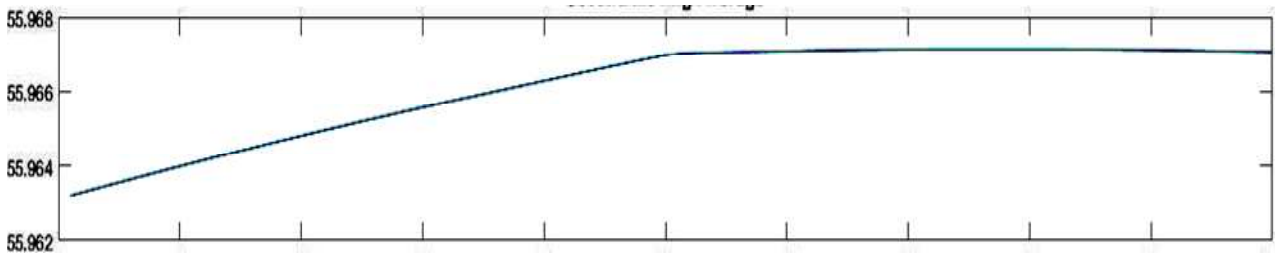


Рис. 15. Графік зміни результатів спостереження після другого етапу фільтрації

Блок схема алгоритму функціонування запропонованої ППСВК приведено на рис. 16 – рис. 17. Структурна схема функціонування розробленого ПЗ за розробленим алгоритмом (рис. 16 – рис. 17.) приведена на рис. 18. На рис. 19 представлено інтерфейс розробленого ПЗ GSoft, вікна якого вказують на його функціональні можливості.

ПЗ GSoft реалізовано за модульним принципом, та за допомогою розробленого графічного інтерфейсу користувача GUI дозволяє працювати у двох режимах: режимі вимірювання кутів та режимі спектрального аналізу.

Параметри вимірювань, а саме: точність статистичної вибірки та величину довірчої імовірності оператор задає в ручному режимі, а кількість вимірювань може бути задана як в ручну так і розрахована автоматично за критерієм Фішера.

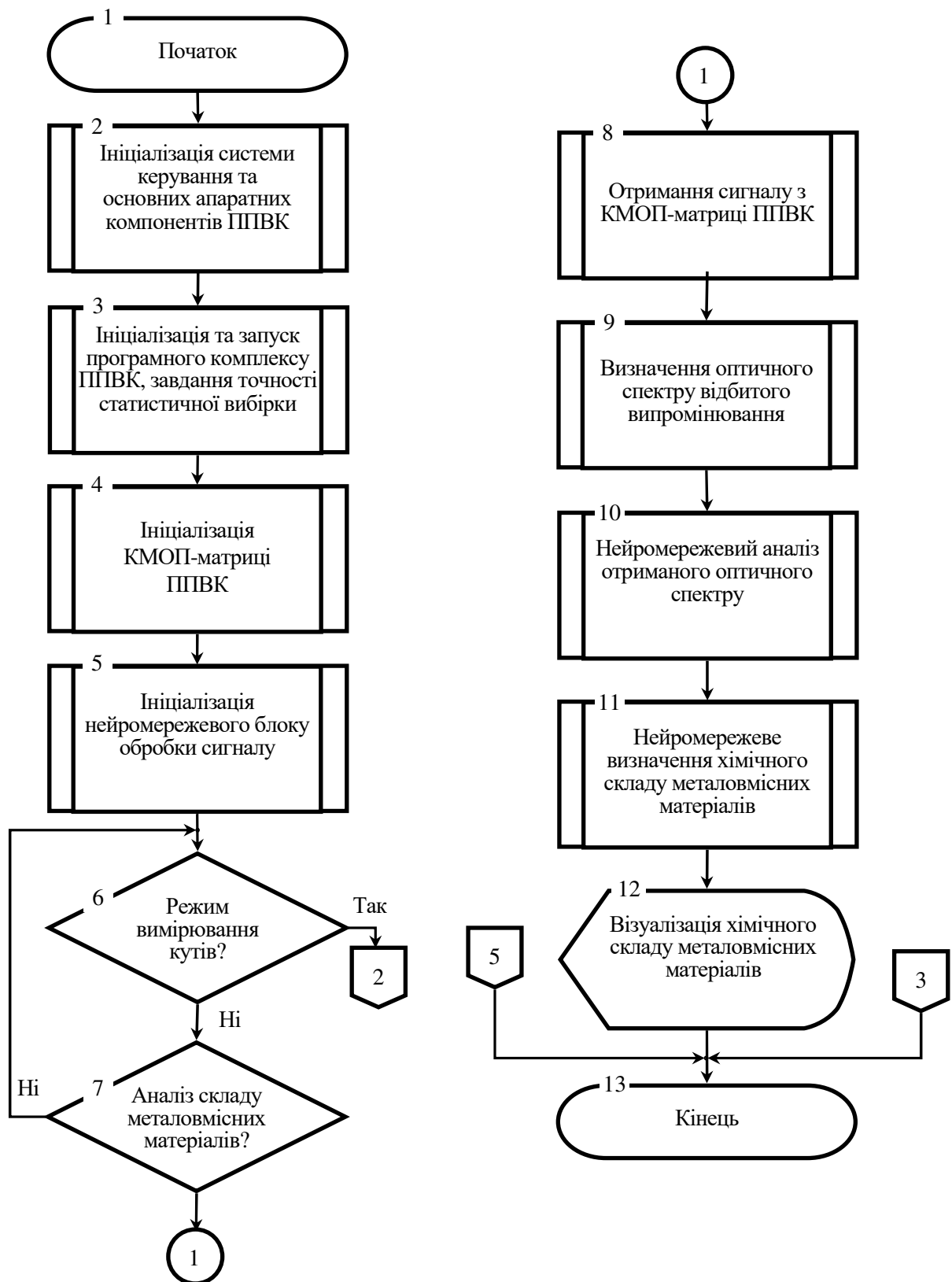


Рис. 16. Блок-схема алгоритму функціонування пропонованої ППСВК (початок)

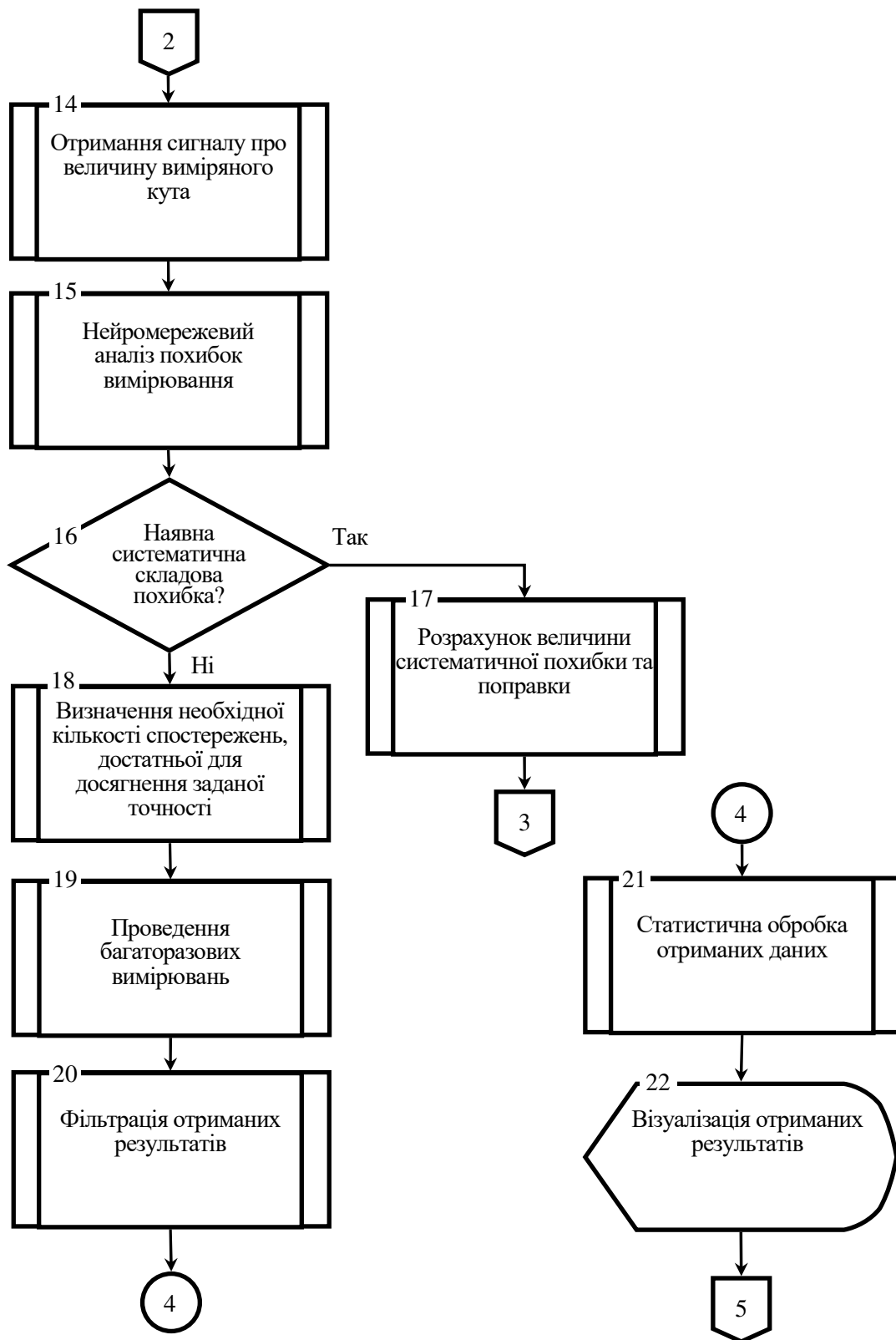


Рис. 17. Блок-схема алгоритму функціонування пропонованої ППСВК (закінчення)

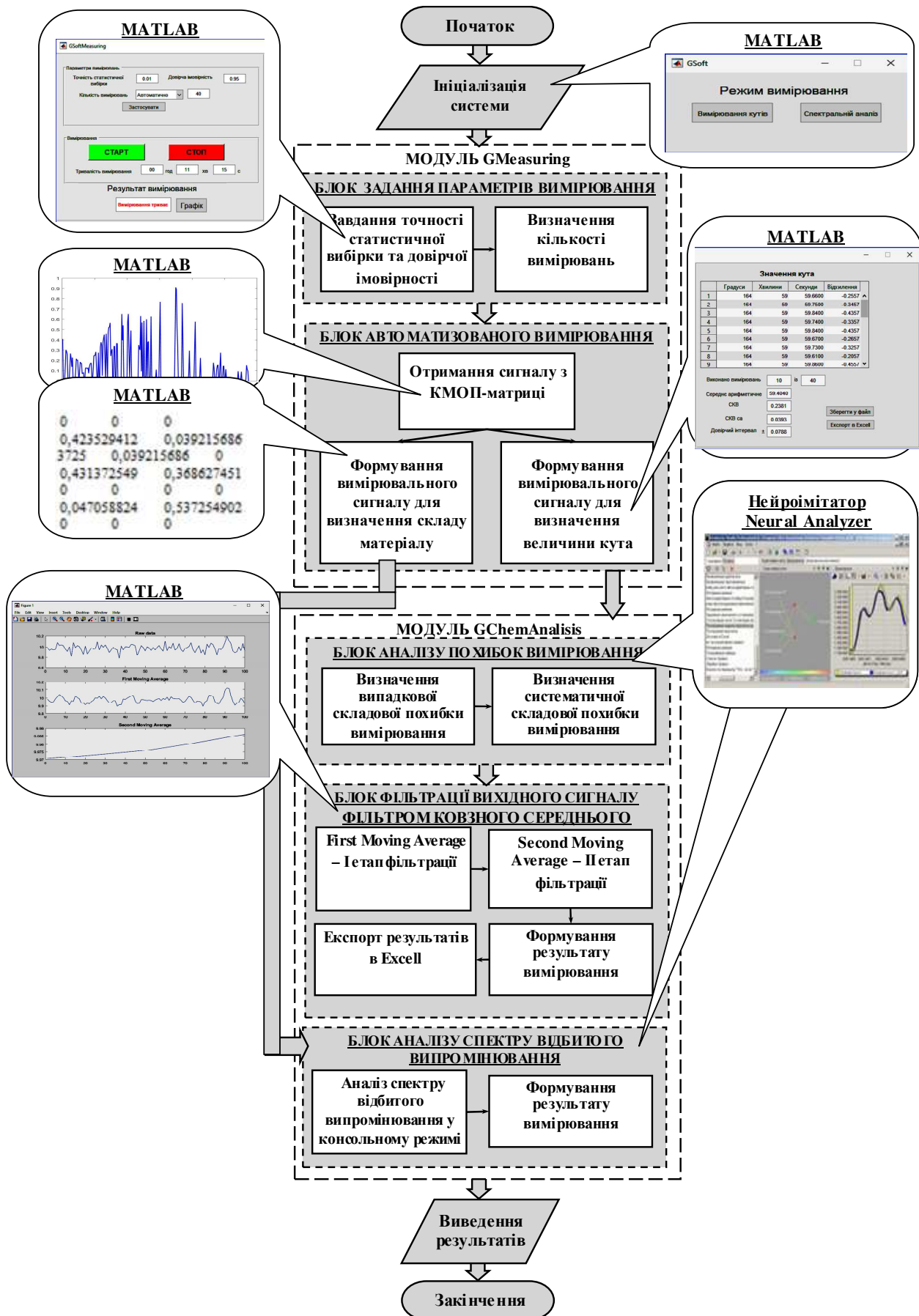


Рис. 18. Структурна схема функціонування розробленого ПЗ GSoft

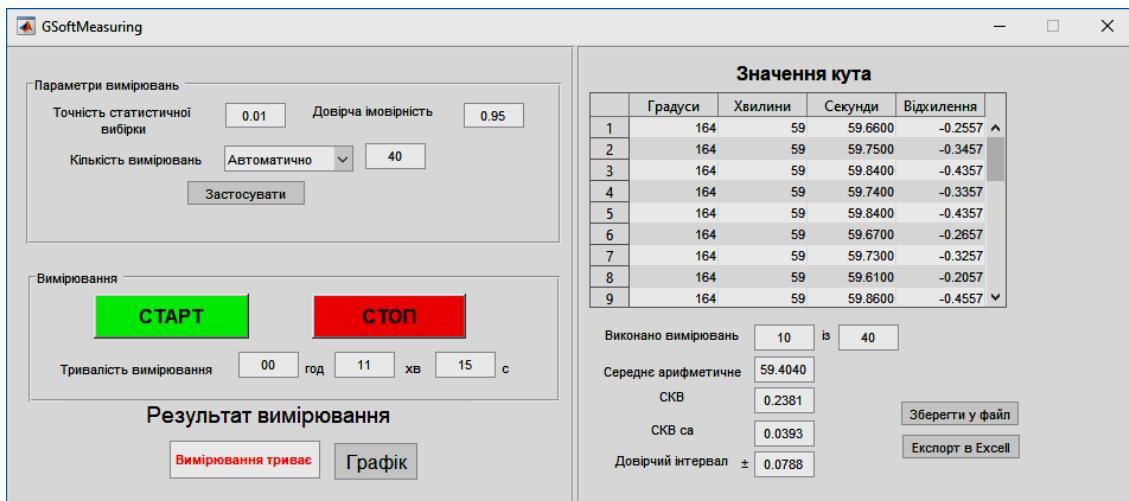


Рис. 19. Діалогове вікно модуля GMeasuring розробленого програмного забезпечення GSoft функціонування пропонованої ППСВК

По закінченню налаштування параметрів вимірювань та натиснення оператором кнопки “СТАРТ”, що активує апаратну частину ППСВК та канал передачі даних відбувається фіксація часу вимірювання та неперервний аналіз даних в режимі реального часу. Отримані результати заносяться до таблиці “Значення кута”, де представляються у форматі: кутові градуси, хвилини, секунди та відхилення у кутових секундах. Зміна результатів вимірювання візуалізується у вигляді графіку (рис. 20).

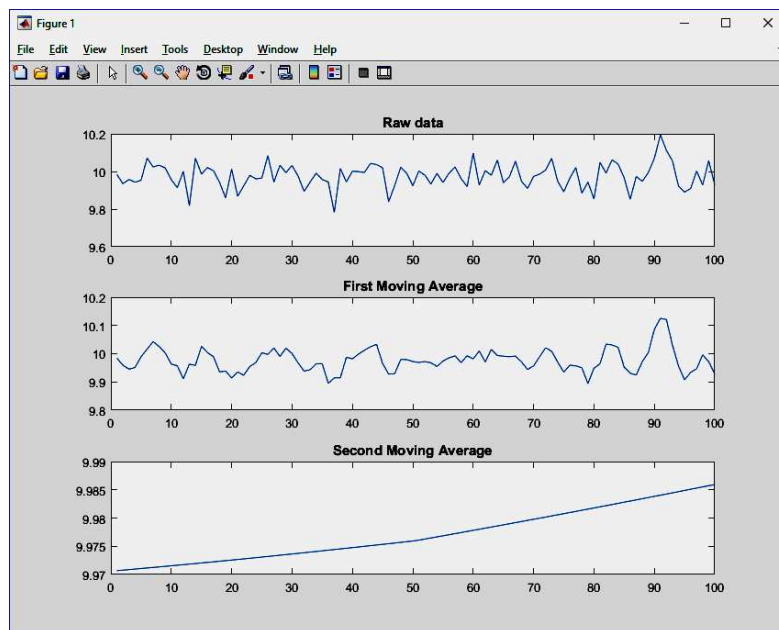


Рис. 20. Візуалізація результатів вимірювання при вимірюванні кута 10°

Представлені на рис. 20 графіки ілюструють зміну результатів вимірювання в часі (Raw data), результат фільтрації дослідних даних на першому (First Moving Average) та другому (Second Moving Average) етапах після першого та другого проходу відповідно фільтром ковзного середнього.

В шостому розділі проведено додаткові теоретичні та експериментальні дослідження та комп’ютерне моделювання параметрів КЛ 3.970.029 (виробництва

ЦКБ “Арсенал”, Україна), що використовується в складі пропонованої ППСВК в якості прецизійного датчика кута (див. розділ 3). Отримані результати теоретичних та експериментальних досліджень показали добру збіжність. Дослідження проводились без та з врахуванням зміни швидкості обертання Землі навколо своєї осі.

Структурна схема флуктуаційних процесів та похибок КЛ приведена на рис. 21.

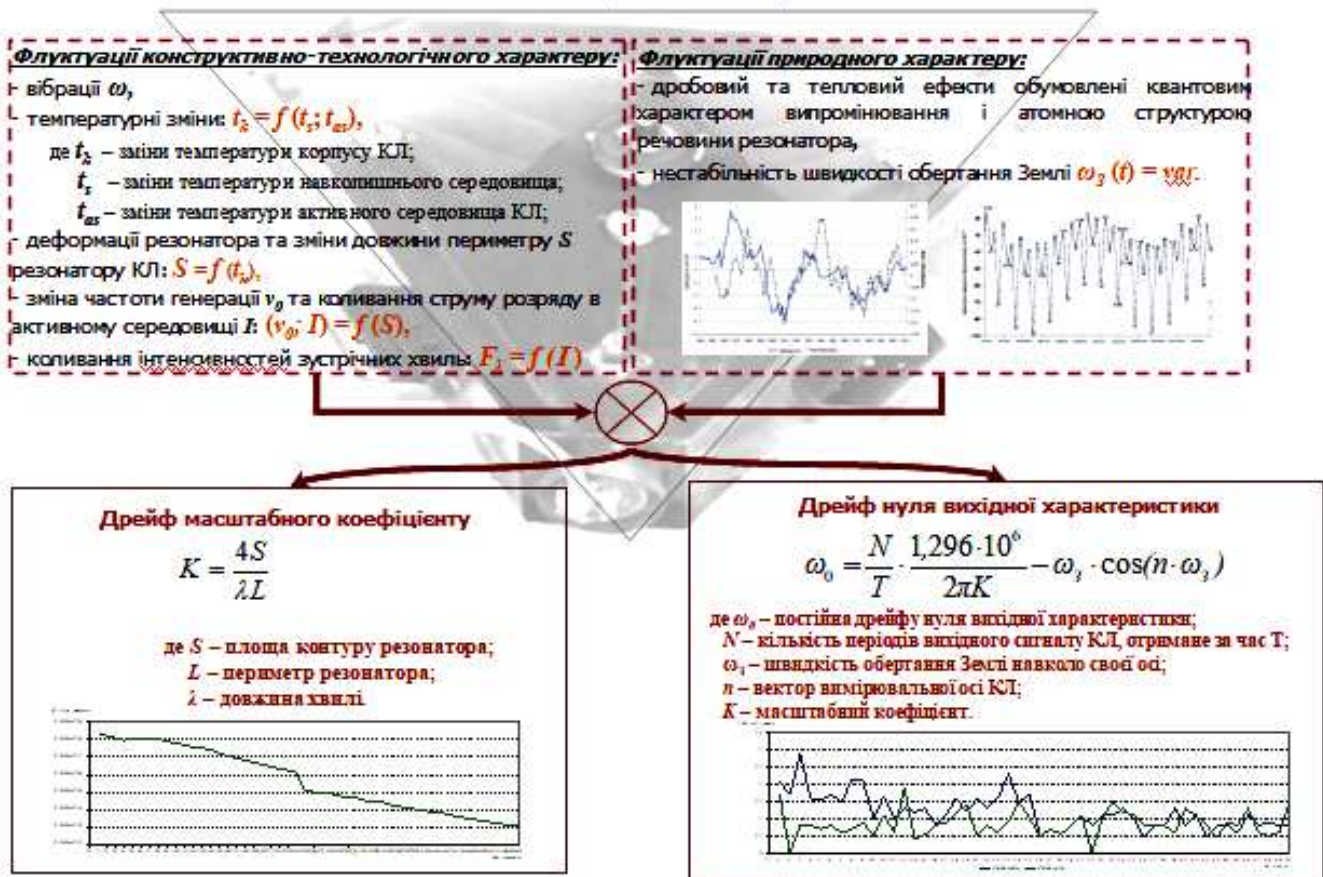


Рис. 21. Структурна схема флуктуаційних процесів та похибок КЛ

Отримані результати теоретичних та експериментальних досліджень дрейфу масштабного коефіцієнту та дрейфу нуля вихідної характеристик приведені на рис. 22, рис. 23.

Оцінка масштабного коефіцієнту проводилась з рахуванням та без врахування зміни швидкості обертання Землі навколо своєї осі. Як вказувалось в розділі 3 зміна швидкості обертання Землі має вплив на роботу КЛ та призводить до суттєвих значень похибок вимірювання кутів. Тому для часткового зменшення похибки, що виникає від впливу зміни швидкості обертання Землі при вимірюваннях встановлювали КЛ таким чином, щоб його вісь обертання була паралельна осі обертання Землі. Тобто, щоб кут відхилення осі обертання КЛ та осі обертання Землі прямував до нуля. В такому випадку лінійний дрейф масштабного коефіцієнта КЛ становить близько 0,01361 пер/с та обумовлює похибку вимірювання кутів не більше 0, 1”.

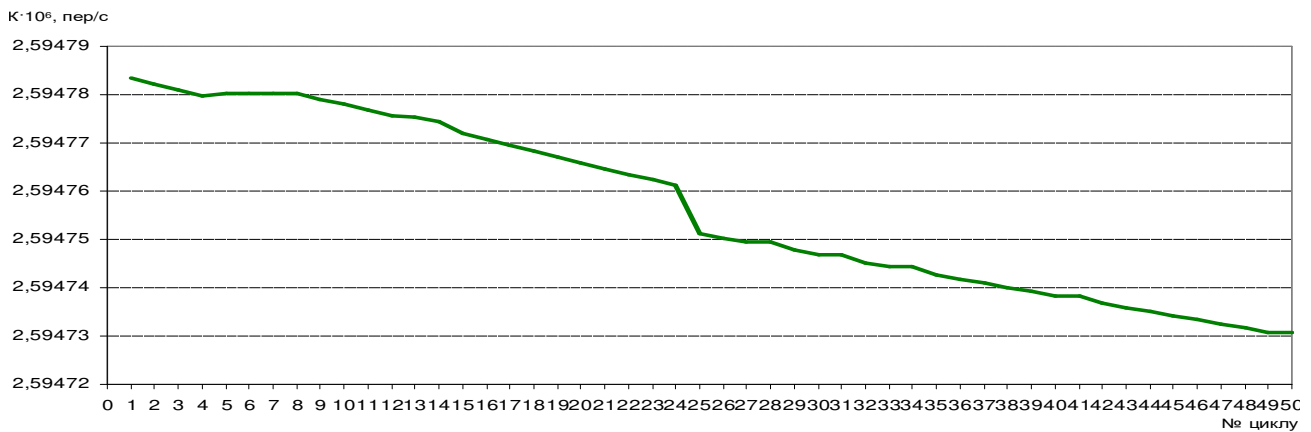


Рис. 22. Дрейф масштабного коефіцієнту при швидкості обертання поворотного пристрою з КЛ $\omega = 90^\circ/\text{с}$ з врахуванням зміни швидкості обертання Землі навколо своєї осі

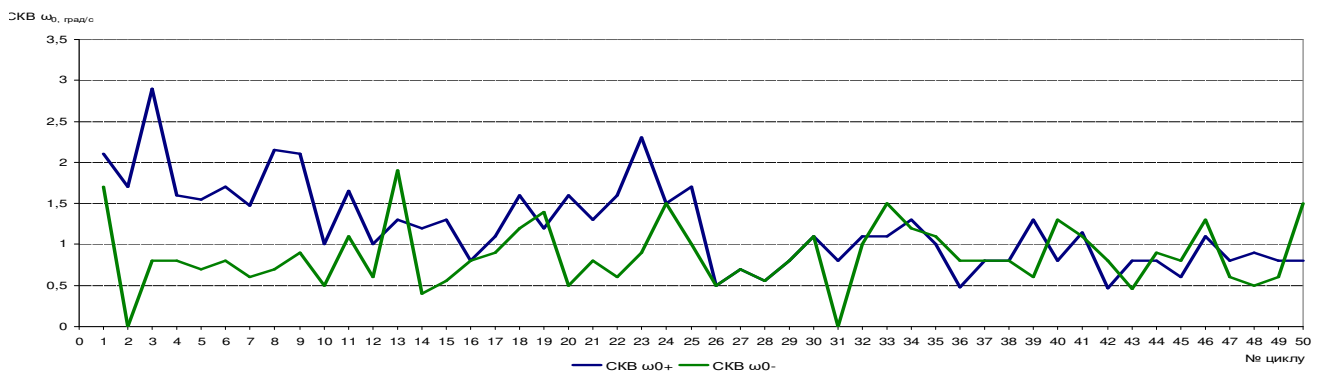


Рис. 23. Нестабільність дрейфу нуля вихідної характеристики КЛ

Постійна складова дрейфу ω_0 становить $\omega_0 \approx 0,3389795$ Гц.

Отримані результати підтверджують можливість практичного використання КЛ 3.970.029 у складі пропонованої ППСВК в якості прецизійного датчика кута. Так у КЛ, що використовується у складі пропонованої ППСВК в якості прецизійного перетворювача кута наявна система стабілізації периметра та система стабілізації потужності випромінювання, які дозволяють підтримувати точнісні параметри КЛ в допустимих межах і забезпечувати високу точність вимірювання до $0,1''$.

В загальних висновках підбито підсумки основних результатів досліджень, проведених у дисертаційній роботі, як теоретичних, так і експериментальних, отриманих при комп'ютерному моделюванні.

В додатках приведені акти впровадження результатів дисертаційної роботи, копії патентів, список опублікованих праць за темою дисертації.

ВИСНОВКИ ТА ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

У дисертаційній роботі вирішена важлива наукова проблема підвищення точності та швидкодії гоніометричних вимірювань шляхом розробки прецизійної приладової системи вимірювання кутів за рахунок використання фізичних явищ лазерної спектроскопії, фізичних принципів роботи напівпровідникових фоточутливих елементів, нейромережових технологій, теорії ймовірності та

математичної статистики, методів системного підходу, теорії множин, дискретної та обчислювальної математики, а також комп'ютерного моделювання.

Основні наукові та практичні *результати* роботи наступні:

1. Як результат теоретично узагальнених підходів до підвищення точності та швидкодії вимірювання кутів, виокремлено нові методи та засоби, синергетична інтеграція яких в складі пропонованої ППСВК дозволила підвищити точність на 0,2'' (3 рази) та швидкодію вимірювання до масштабів реального часу, а також розширити функціональні можливості ППСВК порівняно із відомими.

2. Обґрунтовано сукупність принципів побудови пропонованої ППСВК, комплексне дотримання яких дозволило отримати якісно нову вимірювальну систему підвищеної точності та швидкодії порівняно із відомими.

3. Розроблено новітню математичну модель похибки в частині врахування похибки фоточутливої КМОП-матриці шляхом виокремлення флуктуаційних напруг, які виникають через дробовий та тепловий ефекти, а також нестабільності швидкості обертання Землі, що в результаті дало можливість їх комплексного врахування при визначенні похибок та підвищити точність вимірювання пропонованої ППСВ на 0,2'' (3 рази) порівняно відомими науковими результатами.

4. Запропоновано підхід та методику визначення необхідної кількості спостережень при багаторазових вимірюваннях, яка достатня для досягнення заданої точності та використовується при нормуванні випадкових складових похибок вимірювання кутів. Експериментально доведено, що запропонована методика дозволила обґрунтувати кількість спостережень при багаторазових вимірюваннях, в результаті чого було підвищено швидкодію у 1,3 рази порівняно із відомими науковими результатами при вимірюванні кутів з позитивним декрементом точності.

5. Розроблено ШНМ та проведено їх експериментальні дослідження шляхом комп'ютерного моделювання, що підтверджують працездатність пропонованих ШНМ та вказують на ефективність їх застосування у складі пропонованої ППСВК на ниві недостатньої автоматизації визначення складових похибок вимірювання за принципом їх декомпозиції із застосуванням дисперсійного критерію Фішера.

6. На підставі розвитку методу ковзного середнього здійснено придушення завад та підвищено якість вихідного сигналу для підвищення точності вимірювання кутів пропонованою ППСВК.

7. Розроблене алгоритмічне та програмне забезпечення з використанням нейроімітатора, середовища математичного моделювання та мови програмування MATLAB дало можливість автоматизувати функціонування пропонованої ППСВК, пришвидшити процес вимірювання та обробки інформації, а також забезпечити підвищення швидкодії та точності отриманих кінцевих результатів.

8. Практичні та теоретичні результати роботи впроваджено на ПАТ "НВО "Київський завод автоматики" при підвищенні точності та швидкодії кутових вимірювань та у навчальний процес Житомирського державного технологічного університету при підготовці фахівців за спеціальністю "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології".

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Монографії:

1. Сазонов А. Ю. Наукові основи автоматизованого керування точністю позиціонування промислових роботів при синтезі спеціалізованих гнучких інтегрованих систем. Монографія / А. Ю. Сазонов, В. А. Кирилович, І. Ю. Черепанська, О. М. Безвесільна. – Житомир : ЖДТУ, 2015. – 271 с.

2. Черепанська І. Ю. Теорія і принципи побудови автоматизованої системи для лінійних і кутових переміщень об'єктів виробництва з використанням математичного апарату кватерніонів і елементів штучного інтелекту. Монографія / І. Ю. Черепанська, В. А. Кирилович, О. М. Безвесільна, А. Ю. Сазонов. – Житомир: ЖДТУ, 2016. – 326 с.

3. Черепанська І. Ю. Штучні нейронні мережі при вирішенні задач у технологічних вимірюваннях, приладобудуванні та проектуванні гнучких виробничих систем. Монографія / І. Ю. Черепанська, О. М. Безвесільна, А. Ю. Сазонов, Т. В. Хильченко. – Житомир: ЖДТУ, 2017. – 217 с.

4. Черепанська І. Ю. Штучні нейронні мережі для вирішення задач технологічної підготовки гнучкого виробництва. Монографія. / І. Ю. Черепанська, О. М. Безвесільна, А. Ю. Сазонов. – Київ: ДП “НВЦ “Пріорітети”, 2018. – 192 с.

Статті у фахових виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

5. Cherepanska I., Automated technological complex to precise angles measurement based on goniometer / I. Cherepanska, E. Bezvesilna, A. Sazonov, A. Lavrishev // Technological Complexes. – 2015. – № 1/2 (12). – Р. 38–45. Індексція *Index Copernicus, РИНЦ, Ulrich's Periodicals Directory* та ін.

Здобувачем розроблено структурну схему автоматизованого технологічного комплексу високоточного вимірювання кутів на базі гоніометра, що дозволяє реалізувати автоматизовану обробку вимірювальної інформації в режимі реального часу.

6. Черепанська І. Ю. До питання підвищення точності кутових вимірювань гоніометричними системами / І. Ю. Черепанська, О. М. Безвесільна, А. Ю. Сазонов // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – Житомир: ЖДТУ. – 2016. – № 1 (76). – С. 92 – 99. Індексція *WorldCat, BASE, eLibrary, Google Scholar*.

Здобувачем проаналізовано, а також представлено сукупністю відповідних компонентів систематичної похибки розроблюваної автоматизованої високоточної гоніометричної системи, за результатами попереднього аналізу джерел її виникнення.

7. Безвесільна О. М. Експериментальні дослідження інтелектуального високоточного термоанемометричного витратоміру біопалива / О. М. Безвесільна, І. Ю. Черепанська, А. Ю. Сазонов, С. О. Нечай // Технологический аудит и резервы производства. – 2016. – № 4/1(30). – С. 22 – 26. Індексція *Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Director, DRIVER, BASE, , РИНЦ, DOAJ, WorldCat, EBSCO*, та ін.

Здобувачем розроблено нейропроцесор для компенсації динамічних похибок інтелектуального високоточного термоанемометричного витратоміру біопалива.

8. Irina Cherepanska. The procedure for determining the number of measurements in the normalization of random error of an information-measuring system with elements of artificial intelligence / Irina Cherepanska, Elena Bezvesilna, Artem Sazonov, Sergey Nechai, Tatiana Khylichenko // Eastern-European journal of enterprise technologies. –

2017. – № 5/9 (89). – Р. 58 – 67. Індексція *Scopus*.

Здобувачем розглянуто особливості процесу оцінки та нормування випадкової складової похибки вимірювання гоніометричної системи з елементами штучного інтелекту; розроблено загальну методику нормування випадкової складової похибки вимірювання, яка дозволить обґрунтовано визначати необхідну та достатню кількість повторів вимірювань для досягнення заданої точності.

9. Irina Cherepanska. Development of artificial neural network for determining the components of errors when measuring angles using a goniometric software–hardware complex / Irina Cherepanska, Elena Bezvesilna, Artem Sazonov, Sergey Nechai, Oleksandr Pidtychenko // *Eastern–European journal of enterprise technologies*. – 2018. – № 9 (95). – Р. 43 – 51. Індексція *Scopus*.

Здобувачем розроблено штучну нейронну мережу для визначення складових похибок вимірювання кутів автоматизованими гоніометричними системами.

10. Irina Cherepanska. Intelligent precise goniometric system of analysis of spectral distribution intensities for definition of chemical composition of metal–containing substances / I. Cherepanska, O. Bezvesilna, Yu. Koval, A. Sazonov // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2019. – Vol. 41. – № 2(41). – Р. 263–278. Індексція *Scopus*.

Здобувачем розроблено нову прецизійну інтелектуальну гоніометричну систему на базі лазерного гоніометра, CMOS–матриці та штучної нейронної мережі, а також на основі аналізу методу спектроскопії, нейромережевих технологій та фізичних принципів роботи фотолементів.

11. Черепанська І.Ю. Штучна нейронна мережа для автоматизованого розпізнавання складових похибок вимірювання / І.Ю. Черепанська, О.М. Безвесільна, А.Ю. Сазонов // *Вісник Хмельницького національного університету*. Серія: Технічні науки. – Хмельницький: ХНУ. – 2019. – №1 (269). С. 137–145 Індексція *Index Copernicus, Google Scholar, РИИЦ, Polish Scholarly Bibliography*.

Здобувачем розроблено штучну нейронну мережу, яка дозволяє розпізнавати складові похибок вимірювання в режимі реального часу при гоніометричних вимірюваннях величин плоского кута багатограних призм та є альтернативою традиційному методу дисперсійного аналізу за критерієм Фішера множини вимірювальних даних, а також дозволяє автоматизувати аналіз вимірювальної інформації при нормуванні похибок вимірювання.

12. Черепанська І.Ю. Прецизійна інтелектуальна гоніометрична система / І.Ю. Черепанська, О.М. Безвесільна, А.Ю. Сазонов // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. Серія Автоматика та інформаційно–вимірювальна техніка. – Вінницький НТУ. – 2019. – № 2(143). – С. 7 – 14. Індексція *Index Copernicus International, Google Scholar*.

Здобувачем розроблено інтелектуальну гоніометричну систему та штучну нейронну мережу

Статті у фахових виданнях:

13. Черепанська І. Ю. Методична основа системи підтримки прийняття рішень при автоматизованому виборі пристроїв орієнтування / І. Ю. Черепанська, В. А. Кирилович // *Вісник Житомирського державного технологічного університету*. Серія: Технічні науки. – Житомир: ЖДТУ. – 2008. – № 4 (47). – С. 147 – 154.

Здобувачем розроблено методику автоматизованого вибору пристроїв орієнтування, як основу системи підтримки прийняття рішень для автоматизації процесу керування вибором пристроїв орієнтування.

14. Черепанська І. Ю. Система підтримки прийняття рішень як основа автоматизованого вибору пристроїв орієнтування / І. Ю. Черепанська, В. А. Кирилович // *Вісник Житомирського державного технологічного університету*.

Серія: Технічні науки. – Житомир: ЖДТУ. – 2008. – № 3 (46). – С. 136–141.

Здобувачем розроблено систему підтримки прийняття рішень, що орієнтована на аналіз значних об'ємів різномірної інформації при автоматизації процесу вибору пристроїв орієнтування для гнучких інтегрованих систем.

15. Черепанська І. Ю. Використання штучних нейронних мереж для задач класифікації пристроїв орієнтування при проектуванні ГІС / І. Ю. Черепанська, В. А. Кирилович // Вестник Севастопольского национального технического университета / Автоматизация процессов и управление. – Севастополь: Изд-во СевНТУ. – 2009. – № 95. – С. 129 – 134.

Здобувачем запропоновано підхід до створення автоматизованої класифікації пристроїв орієнтування з використанням штучних нейронних мереж.

16. Черепанська І. Ю. Програмне забезпечення для автоматизації процесу керування вибором пристроїв орієнтування гнучких інтегрованих систем / І. Ю. Черепанська, В. А. Кирилович, І. В. Коробійчук // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – Тернопіль: ТДТУ. – 2009. – № 1 (Том 14). – С. 116–122.

Здобувачем розроблено програмне забезпечення для автоматизації процесу вибору пристроїв орієнтування гнучких інтегрованих систем.

17. Черепанська І. Ю. Експериментальне дослідження роботи штучних нейронних мереж для задач класифікації пристроїв орієнтування механоскладальних ГВС / І. Ю. Черепанська, В. А. Кирилович // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. – Житомир: ЖДТУ. – 2009. – № 6. – С. 180 – 191.

Здобувачем проведено експериментальне дослідження роботи розроблених штучних нейронних мереж для задач класифікації пристроїв орієнтування.

18. Черепанська І. Ю. Адаптивність схватів промислових роботів механообробних ГВК / І. Ю. Черепанська, А. Ю. Сазонов, В. А. Кирилович // Методи розв'язування прикладних задач механіки деформівного твердого тіла. – Дніпропетровськ: Наука і освіта. – 2010. – № 11. – С. 119 – 125

Здобувачем визначено напрямки подолання негативного впливу явища "конфлікт сили" на складові технологічної роботизованої системи при підвищенні точності промислових роботів за умов механообробних ГВК.

19. Кирилович В. А. Адаптивність схватів промислових роботів як напрям підвищення ефективності роботизованих механоскладальних технологій / В. А. Кирилович, І. Ю. Черепанська, А. Ю. Сазонов // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – Житомир: ЖДТУ. – 2010. – № 1 (52). – С. 17 – 25.

Здобувачем досліджено залежність вартості промислових роботів від величини похибки позиціонування.

20. Кирилович В. А. Формування функціональних моделей маніпуляційних систем промислових роботів / В. А. Кирилович, П. П. Мельничук, О. О. Писарчук, І. Ю. Черепанська // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ. – 2011. – № 42. – С. 118 – 124.

Здобувачем підготовлено теоретичне обґрунтування необхідності застосування нового математичного апарату кватерніонів для підвищення точності маніпуляційних систем.

21. Черепанська І. Ю. Експериментальне дослідження роботи інтелектуальних моделей прийняття рішень для задач класифікації об'єктів виробництва ГВС / І. Ю. Черепанська, В. А. Кирилович // Технологічні комплекси: науковий журнал. – Луцьк: Видавництво Луцького національного технічного університету. – 2012. –

№ 1, 2 (5, 6). – С. 255 – 260

Здобувачем розроблено штучні нейронні мережі для задач класифікації об'єктів виробництва ГВС та експериментально досліджено їх роботу.

22. Черепанська І. Ю. Використання штучного інтелекту для керування подачею палива інжекторного двигуна / І. Ю. Черепанська, А. В. Гончаренко // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – Житомир: ЖДТУ. – 2014. – № 1 (68). – С. 3 – 11.

Здобувачем розроблено систему інтелектуального керування подачею палива у інжекторний двигун внутрішнього згорання на основі нечіткої логіки.

Патенти України:

23. Патент на корисну модель 124155 (Україна), МПК: G 01 B 21/22 (2006.01). Спосіб вимірювання кутів / І.Ю. Черепанська, О.М. Безвесільна, А.Ю. Сазонов. – Реєстрац. номер заявки u 2017 09792. Заявл. 09.10.2017; Надр. 26.03.2018, Бюл. №6.

Здобувачу належить основна ідея винаходу.

24. Патент на корисну модель 127373 (Україна), МПК: G 01 B 21/22 (2006.01). Інтелектуальна система вимірювання кутів / І.Ю. Черепанська, О.М. Безвесільна, А.Ю. Сазонов. – Реєстрац. номер заявки u 2018 02424. Заявл. 12.03.2018; Надр. 25.07.2018, Бюл. №14.

Здобувачу належить основна ідея винаходу.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

25. Irina Cherepanska Artificial Neural Network as a Basic Element of the Automated Goniometric System / Irina Cherepanska, Elena Bezvesilna, Artem Sazonov // Recent Advances in Systems, Control and Information Technology. – Warsaw, Poland, 2016. – 827 p. – PP. 43–52. (Springer International Publishing AG 2017) <http://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-319-48923-0>.

Здобувачем визначено вхідні та вихідні вектори і структура штучної нейронної мережі.

26. Черепанська І. Ю. Щодо формування інтегрованого показника якості роботизованих механоскладальних технологій / І. Ю. Черепанська, В. А. Кирилович, В. В. Ренькас, В. М. Мосійчук // Тези міжвузівської науково–практичної конференції, присвяченої Дню науки (Житомир, 17–18 травня 2012 р.). – Житомир, ЖДТУ, 2012. – 390 с. – С. 82 – 83.

Здобувачем надано інформацію щодо змісту інтегрованого показника якості.

27. Черепанська І. Ю. Комбінований підхід до точнісної атестації робочих зон промислових роботів / І. Ю. Черепанська, А.Ю. Сазонов, В.А. Кирилович, Є.І. Орлюк // Матеріали четвертої Міжнародної науково–практичної конференції “Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT–2012)”. – Херсон: ХДМА, 2012. – Том. 1. – 290 с. – С. 109 – 111.

Здобувачем розглянуто фактори, що впливають на точність промислових роботів.

28. Черепанська І. Ю. Алгоритмічне забезпечення програмної точнісної атестації робочих зон промислових роботів / І. Ю. Черепанська, А. Ю. Сазонов // Матеріали Всеукраїнської науково – практичної конференції "Сучасні технології промислового комплексу". – Випуск 2. – Херсон: ХНТУ (факультет машинобудування), 2015. – 162 с. – С. 113 – 115.

Здобувачем викладено відомості щодо точності промислових роботів.

29. Черепанська І. Ю. Автоматизація керування нормуванням часу обробки об'єктів виробництва на свердлувальних верстатах / І. Ю. Черепанська, Д. А. Статкевич // Тези I Всеукраїнської науково–технічної конференції “Комп’ютерні технології: інновації, проблеми, рішення” (17–18 травня 2015 року). – Житомир:

ЖДТУ, 2015. – 156 с. – С. 101 – 102.

Здобувачу належить ідея застосування штучних нейронних мереж для автоматизації керування нормуванням часу.

30. Черепанська І. Ю. Система підтримки прийняття рішень як основа автоматизованого керування якістю на механообробних підприємствах / І. Ю. Черепанська, О. А. Сусік // Сборник статей научно–информационного центра “Знание” по материалам XIII международной заочной научно–практической конференции: “Развитие науки в XXI веке” 1 часть, г. Харьков: сборник со статьями (уровень стандарта, академический уровень). – Х.: научно–информационный центр “Знание”, 2016. – 160 с. – С. 126 – 134.

Здобувачем розроблено структурну схему системи підтримки прийняття рішень для автоматизації керування якістю на механообробних підприємствах.

31. Черепанська І. Ю. Автоматизоване вимірювання кутів при упорядкуванні виробничого середовища у гнучких виробничих системах / І. Ю. Черепанська, А. С. Калита, О. О. Омельчак // Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем (КМОСС–2016): матеріали II Всеукраїнської науково–технічної конференції з міжнародною участю (м. Дніпро, 1–3 листопада 2016 року) / Міністерство освіти і науки України, Державний вищий навчальний заклад “Український державний хіміко–технологічний університет”. – Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2016. – 302 с. – С. 258 – 261.

Здобувачем сформульовані принципи автоматизації вимірювання кутів.

32. Черепанська І. Ю. Автоматизована система вимірювання геометричних параметрів об'єктів виробництва у машинобудуванні / І. Ю. Черепанська, О. В. Герговський // Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем (КМОСС–2016): матеріали II Всеукраїнської науково–технічної конференції з міжнародною участю (м. Дніпро, 1–3 листопада 2016 року) / Міністерство освіти і науки України, Державний вищий навчальний заклад “Український державний хіміко–технологічний університет”. – Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2016. – 302 с. – С. 261 – 263.

Здобувачем проведено аналітичний огляд систем вимірювання геометричних параметрів об'єктів виробництва у машинобудуванні.

33. Черепанська І. Ю. Інтелектуальний високоточний термоанемометричний витратомір біопалива / І. Ю. Черепанська, О. М. Безвесільна, А. Ю. Сазонов, О. О. Добржанський // Метрологія, технічне регулювання, якість: досягнення та перспективи: матеріали Шостої Міжнародної науково–практичної конференції (Одеса, 11–12 жовтня 2016 р.); Одеська державна академія технічного регулювання та якості. – Одеса: Бондаренко М. О., 2016. – 266 с. – С. 164 – 166.

Здобувачем проведено дослідження точності високоточного термоанемометричного витратоміру біопалива.

34. Cherepanska I. Decision support system as the basis of automated quality control in mechanical engineering / Irina Cherepanska, Alexander Susik, Artem Sazonov // System Control and Information Technology. – Warsaw. – 20–21.05.2016

Здобувачем розроблено структурну схему штучної нейронної мережі.

35. Черепанська І. Ю. Дослідження характеристик апаратної та часової складності логічних елементів “виключаюче АБО” та “провідне І” як компонентів обчислювальних засобів систем моніторингу об'єктів управління / А. Ю. Сазонов, І. Ю. Черепанська, Д. О. Осіпов // Автоматизоване управління багатовимірними об'єктами на засадах обчислювального інтелекту: матеріали Всеукраїнської науково–практичної конференції (Івано–Франківськ, 17 – 19 жовтня 2018 року) / Міністерство освіти і науки України, Івано–Франківський

національний технічний університет нафти і газу (ІФНТУНГ), Науково-дослідний і проектний інститут ПАТ “Укрнафта”, ТзОВ “Івано-Франківське спеціальне конструкторське бюро засобів автоматизації”, ТзОВ “Мікрол”. – Івано-Франківськ. – 2018. – 250 с. – С. 54 – 56.

Здобувачем проведено аналітичний огляд апаратної та часової складності логічних елементів.

36. Черепанська І.Ю. Прецизійна приладова система вимірювання кутів / І.Ю. Черепанська, О.М. Безвесільна, А.Ю. Сазонов // Aktuelle themen im kontext der entwicklung der modernen wissenschaften: Zu den materialien der internationalen wissenschaftlich-praktischen konferenz (Dresden, 23 Januar, 2019). – Dresden: NGO «Europäische Wissenschaftsplattform». – 2019. – В. 5. – 122 р. – Р. 79 – 82.

Здобувачем сформульовані принципи побудови прецизійної приладової системи вимірювання кутів.

37. Cherepanska Irin. Neural network technology for recognizing errors components of the precise instrumental goniometric system / Cherepanska Irina, Bezvesilna Olena, Sazonov Artem // La science et la technologie à l'ère de la société de l'information: coll. de papiers scientifiques «ΛΟΓΟΣ» avec des matériaux de la conf. scientifique et pratique internationale, (Bordeaux, 3 mars, 2019). – Bordeaux : OP «Plateforme scientifique européenne», 2019. – V.9. – 106 p. – Р. 43 – 47.

Здобувачем розроблено штучну нейронну мережу та досліджено її роботу.

АНОТАЦІЯ

Черепанська І. Ю. Прецизійна приладова система вимірювання кутів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.01 – прилади та методи вимірювання механічних величин. – Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” МОН України, Київ, 2019.

У дисертаційній роботі вирішена важлива наукова проблема підвищення точності та швидкодії приладових систем вимірювання кутів шляхом розробки та дослідження прецизійної приладової системи вимірювання кутів (ППСВК) на основі аналізу та застосування фізичних явищ та принципів роботи лазерної спектроскопії, нових напівпровідникових фоточутливих елементів, високопродуктивних засобів автоматизації та нейромережових технологій, а також нових методів і алгоритмів обробки інформації.

В результаті виконаних досліджень в роботі отримано ППСВК, підвищеної точності та швидкодії з розширеними функціональними можливостями. Підвищено швидкість вимірювань кутів запропонованої ППСВК у 1,3 рази або на 25 % порівняно із результатами відомих наукових досліджень, а точність до 0,1”.

ППСВК побудована як багаторівнева сукупність різних за призначенням та функціонуванням технічних засобів з неоднорідними властивостями, які реалізують запропоновані методи обробки вимірювальної інформації.

Запропоновану ППСВК побудовано за принципами синергетичної інтеграції та емерджентності, шляхом застосування фоточутливої КМОП-матриці та штучних нейронних мереж, що дозволило не тільки підвищити точність та швидкість вимірювання кутів але й розширити функціональні можливості запропонованої ППСВК (безконтактного вимірювання кутів та експрес-аналізу інтенсивностей спектрального розподілу для визначення хімічного складу металовмісних

матеріалів). Пропонована ППСВК дозволяє проводити автоматичне визначення вмісту хімічних елементів у складі металовмісних матеріалів в режимі реального часу зі швидкістю 2,5 с.

Ключові слова: штучна нейронна мережа, фоточутлива КМОП-матриця, флуктуаційна напруга, дробовий ефект, тепловий шум, дисперсійний критерій Фішера, інтенсивність спектрального розподілу, кутові вимірювання.

АННОТАЦИЯ

Черепанская И. Ю. Прецизионная приборная система измерения углов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.11.01 – приборы и методы измерения механических величин.

– Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» МОН Украины, Киев, 2019.

В диссертационной работе решена важная научная проблема повышения точности и быстродействия гониометрической измерений, путем разработки и исследования прецизионной приборной системы измерения углов, на основе анализа и применения физических явлений и принципов работы лазерной спектроскопии, новых полупроводниковых фоточувствительных элементов, высокопроизводительных средств автоматизации и нейросетевых технологий, а также новых методов и алгоритмов обработки информации.

Предложены с единых системных позиций общие принципы построения прецизионной приборной системы измерения углов (ППСИУ), как многоуровневой совокупности различных технических средств с неоднородными свойствами, которые заключаются в формировании функциональных отношений между параметрами ее уровней и внутри них с учетом принятого системного подхода. Это дало возможность осуществить синергетическую интеграцию и реализацию предлагаемых методов (обработки измерительной информации) и средств (искусственных нейронных сетей - ИНС, КМОП-матрицы).

За принципами синергетической интеграции и эмерджентности, путем применения фоточувствительной КМОП-матрицы и ИНС предложено ППСИУ со значительно расширенными функциональными возможностями (бесконтактного измерения углов и экспресс-анализа интенсивностей спектрального распределения для определения химического состава металлосодержащих материалов).

Предложена математическая модель погрешности ППСИУ в части учета погрешности фоточувствительной КМОП-матрицы, путем введения флуктуационных напряжений, возникающих на пикселях матрицы обусловленных возникновением дробового эффекта и тепловом движении зарядов соответственно, что в результате позволяет повысить точность измерения ППСИУ.

Предложен новый подход к автоматическому распознаванию систематических и случайных составляющих погрешностей измерения углов, основанный на использовании ИНС на этапе анализа и обработки

измерительной информации, экспресс-анализа составляющих погрешностей измерения за принципом декомпозиции, что позволило повысить точность и быстродействие обработки измеряемой информации.

Предложено использование ИНС для экспресс-анализа интенсивностей спектрального распределения химических веществ, что дало принципиальную возможность проводить автоматическое определение их содержания в составе металлосодержащих материалов в режиме реального времени со скоростью 2,5 с.

Проведено определение составляющих погрешностей измерения углов на ЭВМ с использованием ИНС, что дало принципиальную возможность автоматизировать процесс обработки измерительной информации, а также проводить экспресс-анализ составляющих погрешностей измерения в режиме реального времени со скоростью 2 с.

Сравнение результатов моделирования на ЭВМ процесса определения составляющих погрешностей измерения углов для многогранных призм, которые используются для регулировки и настройки угломерных приборов и непосредственного измерения углов промышленных изделий с использованием двух подходов - применение ИНС и дисперсионного анализа по критерию Фишера, указало на приоритетность ИНС по быстродействию, по сравнению с традиционно используемым критерием.

Предложен регламент определения количества измерений, который позволяет обоснованно определить необходимое количество измерений углов ППСИУ, которое будет достаточным для достижения заданной точности.

В результате экспериментально доказано, что предложенный метод позволяет повысить быстродействие (в 1,3 раза или на 25 %) измерений углов по сравнению с известными.

Ключевые слова: искусственная нейронная сеть, фоточувствительная КМОП-матрица, флуктуационное напряжение, дробовой эффект, тепловой шум, дисперсионный критерий Фишера, интенсивность спектрального распределения, угловые измерения.

ABSTRACT

Cherepanska I. Yu. Precise instrument system for angles measuring. – Manuscript.

The Thesis for obtaining doctor of technical science scientific degree on the specialty 05.11.01 – instruments and methods of the measuring mechanical values.– National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2019.

The important scientific problem of the accuracy and speed of goniometric measurements improvement and has been solved in the thesis by the development and investigation Precise instrument system for angles measuring based on the analysis and application physical phenomenon of the laser spectroscopy, new semiconductor photosensitive elements, and neural network technologies as well as new methods and algorithms of the data processing.

The general principles of construction of Precision Instrumentation System for Angles Measuring (PISAM), as a multilevel set of different technical means with heterogeneous properties, which consist in forming functional relations between the parameters of its levels and inside them taking into account the adopted system, are offered from the unified system positions. This allowed synergistic integration and implementation of the proposed methods (measurement information processing) and means (artificial neural networks –ANN, CMOS).

By the principles of synergistic integration and emergence, using CMOS and ANN, PISAM with significantly expanded functionality (contactless measurement of angles and rapid analysis of the intensities of the spectral distribution to determine the chemical composition of metals) is proposed.

A mathematical model of the error of the PISAM is proposed in the part of taking into account the error of the CMOS, by introducing fluctuation stresses that occur on the pixels of the matrix due to the fractional effect and in the thermal motion of charges respectively, which as a result makes it possible to improve the accuracy of the measurement.

A new approach to automatic recognition of systematic and random components of angles of measurement of angles is proposed, based on the use of ANN at the stage of analysis and processing of measurement information, rapid analysis of components of measurement errors by the principle of decomposition, which allowed to improve the accuracy and speed of information processing.

The use of ANN for express analysis of the intensities of the spectral distribution of chemicals has been proposed, which has made it possible to carry out the automatic determination of their content in the composition of metal-containing materials in real time with a speed of 2,5 sec.

The determination of the component errors of measurement of angles on the computer using ANN, which gave a basic opportunity to automate the process of processing measurement information, as well as to conduct rapid analysis of the component errors in measurement in real time with a speed of 2 sec.

Comparison of the results of computer simulation of the process of determining the components of the measurement error of angles for multifaceted prisms used to adjust and adjust angular meters and direct measurement of angles of industrial products using two approaches - the use of ANN and Fisher's analysis of variance, indicated the advantage of ANN compared to the traditionally used criterion.

A regulation for determining the number of measurements is proposed, which allows to reasonably determine the required number of measurements of the angles of PISAM, which will be sufficient to achieve the given accuracy.

As a result, it is experimentally proved that the proposed method allows to increase the speed (1,3 times or 25 %) of the measurements of angles in comparison with the known ones.

Key words: artificial neural network, CMOS, fluctuation voltage, fractional effect, thermal noise, Fisher's variance test, intensity of spectral distribution, angular measurements.

Підписано до друку 25.06.2019 р. Формат 60х90 1/16.
Друк офсетний. Папір друкарський. Умовн. друк. арк. 1,9.
Наклад 100 прим. Зам. № 07-14 від 25 червня 2019 р.

Віддруковано ТОВ “Віндрук”
10005, м. Житомир, вул. Покровська, 103

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб’єктів видавничої справи
Серія ДК № 4548 від 21.05.2013 р.